สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง

T042401

นางสาวราตรี ปิ่นทอง
นางสาวลักษณา ตันติจรรยารัตน์
นางสาวสุธาสินี วงศ์ศรีวัฒนกุล

ปกน.
ส 222 ก
ล43

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 42401
วัน, เดือน, ปี... 20 พ.ค. 2545

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

b11203375

The Adsorption of Dye Solutions Using Maize and Cassava Stalks

Miss Ratree Pintong

Miss Laksana Tantichanyarat

Miss Suthasinee Wongsriwatthanakul

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง
โดย	นางสาวราตรี ปิ่นทอง
	นางสาวลักษณา ตันติจรรยารัตน์
	นางสาวสุธาสินี วงศ์ศรีวัฒนกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

.....กรรมการ
(ดร.โจโกะ เทเรซ่า อิโต)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง

โดย นางสาวราตรี ปิ่นทอง รหัสประจำตัว 40010642

นางสาวลักษณา ตันติจรรยารัตน์ รหัสประจำตัว 40010652

นางสาวสุธาสินี วงศ์ศรีวัฒนกุล รหัสประจำตัว 40010881

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่ใช้วิธีการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานค่อนข้างสูง โครงงานนี้ศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม Methylene Blue และ Congo Red ด้วยต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย การทดลองแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาความสามารถในการดูดซับ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C พบว่าต้นข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับดีกว่าต้นมันสำปะหลัง และ Methylene Blue ถูกดูดซับได้ดีกว่า Congo Red ผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir isotherm การทดลองตอนที่ 2 ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเร็วรอบในการปั่นกวน (350, 450 และ 500 rpm) ขนาดของตัวดูดซับ (Mesh number 20-60 และ 60-100) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (100, 200 และ 300 ppm) และอุณหภูมิในการดูดซับ (25, 35 และ 45 °C) พบว่า ความเร็วรอบในการปั่นกวนและขนาดของตัวดูดซับมีผลน้อยมากต่อการดูดซับ อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการดูดซับและความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับสูงขึ้นอัตราการดูดซับจะสูงขึ้น และความสามารถในการดูดซับของต้นมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของต้นข้าวโพดจะลดลง จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง และค่า E_a ของ Methylene Blue จะต่ำกว่า Congo Red

Report Title	The Adsorption of Dye Solutions Using Maize and Cassava Stalks		
By	Miss Ratree	Pintong	ID.40010642
	Miss Laksana	Tantichanyarat	ID.40010652
	Miss Suthasinee	Wongsriwatthanakul	ID.40010881
Advisor	Mr. Boonchai	Chotiviriyavanich	
Report for	Bachelor Degree of Chemical Engineering		
	Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering		
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

Abstract

Wastewater from dying plants is generally treated by adsorption using activated carbon which is money-intensive treatment. In this work, the adsorption of dye solutions, Methylene Blue and Congo Red, by maize and cassava stalks was studied. Maize and cassava stalks are plenty and inexpensive agricultural wastes. The experiments have been divided into 2 parts. Part 1 studied the adsorption capacity at the temperature of 35 °C. The experimental results showed that maize stalks adsorbed dye solution more than cassava stalks. Methylene Blue was more easily adsorbed than Congo Red and their results followed Langmuir isotherm. Part 2 studied the effects of agitation speeds (350, 450 and 500 rpm), adsorbent sizes (Mesh number 20-60 and 60-100), concentrations of dye solutions (100, 200 and 300 ppm) and adsorption temperatures (25, 35 and 45 °C). It was found that the agitation speed and the adsorbent size had no significant effect on the adsorption. However, the adsorption rate increased when the concentrations of dye solutions increased. In addition, the adsorption capacity of the cassava stalks increased with an increase in adsorption temperature while the maize stalks gave different results. According to kinetics study, the adsorption of Methylene Blue and Congo Red by maize and cassava stalks followed the psuedo-second order and the activation energy of Methylene Blue was lower than that of Congo Red.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ

อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ ในการค้นคว้า เสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาของการทำโครงงาน รวมทั้งตรวจแก้รายงาน ทำให้โครงงานนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของรายงาน รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการทำโครงงาน

ดร.โจโกะ เทเรซ่า อิโต และ อาจารย์รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของรายงาน

ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ข้อมูลในการทำโครงงานและแนะนำความรู้เกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ

ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงงาน

ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

คุณสุรีย์ ตัญญะปัญญาชน นักศึกษาปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงาน

เจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำโครงงานนี้

หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

นางสาวราตรี ปิ่นทอง

นางสาวลักษณา ตันติจรรยารัตน์

นางสาวสุธาสินี วงศ์ศรีวัฒนกุล

9 เมษายน 2544

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญภาพ ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฑ

สัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฒ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎี 3

2.1 ประเภทของการดูดซับ 3

2.2 กลไกการดูดซับ 5

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ 6

2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ 7

2.5 แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ 9

2.6 อัตราการดูดซับ 13

2.7 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ 15

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการดูดซับสีย้อม 16

บทที่ 3 การทดลอง 22

บทที่ 4 ผลการทดลอง 27

4.1 การศึกษา Adsorption isotherm 27

4.2 การศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม 28

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ 51

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 58

เอกสารอ้างอิง 60

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. สีย้อม 63

ก.1 คุณสมบัติของสีย้อม 63

ก.2 สัญลักษณ์ของสี 64

ก.3 การตั้งชื่อสี 66

ก.4 การจำแนกสีย้อม 66

ก.5 การย้อม 70

ก.6 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 73

ก.7 ประเภทสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย 74

ก.8 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 75

ภาคผนวก ข. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 76

ข.1 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 76

ข.2 กำหนดประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม 79

ข.3 กำหนดประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่อนุญาตให้ระบายน้ำทิ้งให้มีค่ามาตรฐานแตกต่างจากค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 80

ข.4 วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ความถี่ และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 82

ภาคผนวก ค. การหาความเข้มข้นของสารละลายสี 83

ค.1 วิธีการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (Calibration Curve) 83

ค.2 วิธีการหาความเข้มข้นของสารละลายสี 83

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

ค.3 กราฟเทียบมาตรฐาน 83
ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm 86
ภาคผนวก จ ตารางแสดงผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับ 92
ภาคผนวก ฉ ตารางแสดงผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับ 96
ภาคผนวก ช ตารางแสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ 100
ภาคผนวก ซ ตารางแสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ 104
ภาคผนวก ฌ ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตรา
การดูดซับ 108

สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2.1 การดูดซับในลักษณะต่าง ๆ ด้วยแรงทางกายภาพ 4

รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ 6

รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบต่าง ๆ 8

รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปกราฟเส้นตรง 11

รูปที่ 2.5 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm 12

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ 15

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 26

รูปที่ 4.1 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60
ที่อุณหภูมิ 35 °C 30

รูปที่ 4.2 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 60-100
ที่อุณหภูมิ 35 °C 30

รูปที่ 4.3 Langmuir adsorption isotherm ของตัวดูดซับ
ขนาด Mesh number 20-60 31

รูปที่ 4.4 Freundlich adsorption isotherm ของตัวดูดซับ
ขนาด Mesh number 20-60 31

รูปที่ 4.5 Langmuir adsorption isotherm ของตัวดูดซับ
ขนาด Mesh number 60-100 32

รูปที่ 4.6 Freundlich adsorption isotherm ของตัวดูดซับ
ขนาด Mesh number 60-100 32

รูปที่ 4.7 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red
โดยต้นข้าวโพด 34

รูปที่ 4.8 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red
โดยต้นมันสำปะหลัง 35

รูปที่ 4.9 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue
โดยต้นข้าวโพด 36

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 4.10 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง 37
รูปที่ 4.11 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด 38
รูปที่ 4.12 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง 39
รูปที่ 4.13 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด 40
รูปที่ 4.14 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง 41
รูปที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด 43
รูปที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง 44
รูปที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด 45
รูปที่ 4.18 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง 46
รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด 47
รูปที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง 48
รูปที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด 49
รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง 50

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 4.23 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red
โดยต้นข้าวโพดในแบบจำลองต่าง ๆ 52
รูปที่ 4.24 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red
โดยต้นมันสำปะหลังในแบบจำลองต่าง ๆ 53
รูปที่ 4.25 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue
โดยต้นข้าวโพดในแบบจำลองต่าง ๆ 54
รูปที่ 4.26 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue
โดยต้นมันสำปะหลังในแบบจำลองต่าง ๆ 55
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln(k) กับ 1/T
ความชันของเส้นมีค่าเท่ากับ $-E_a/R$ 56
รูปที่ ค.1 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสี Congo Red 85
รูปที่ ค.2 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสี Methylene Blue 85

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ สมการ Freundlich 33
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด 56
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง 56
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด 56
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง 56
ตารางที่ 4.6 ค่า E_a ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red และ Methylene Blue
โดยต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60
ที่ความเร็วรอบ 350 rpm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 ppm 57
ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม 76
ตารางที่ ค.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสี Congo Red
และ Methylene Blue 84
ตารางที่ ง.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับ
สารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60
ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 86
ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับ
สารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60
ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 87
ตารางที่ ง.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับ
สารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60
ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 88
ตารางที่ ง.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับ
สารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60
ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 89
ตารางที่ ง.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับ
สารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 60-100
ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 90

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้าที่

ตารางที่ ง.6 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 90

ตารางที่ ง.7 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Methylelne Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 91

ตารางที่ ง.8 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C 91

ตารางที่ จ.1 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 92

ตารางที่ จ.2 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 93

ตารางที่ จ.3 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 94

ตารางที่ จ.4 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 95

ตารางที่ ฉ.1 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 96

ตารางที่ ฉ.2 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 97

ตารางที่ ฉ.3 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 98

ตารางที่ ฉ.4 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 99

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้าที่

ตารางที่ ช.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 100

ตารางที่ ช.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 101

ตารางที่ ช.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 102

ตารางที่ ช.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C 103

ตารางที่ ช.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 104

ตารางที่ ช.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำ-ปะหลัง Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 105

ตารางที่ ช.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าว-โพด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 106

ตารางที่ ช.5 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมัน-สำปะหลัง Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 107

ตารางที่ ฌ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 108

ตารางที่ ฌ.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 109

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้าที่

ตารางที่ ฌ.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ
สารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60
ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 110
ตารางที่ ฌ.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับสาร-
ละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60
ที่ความเร็วรอบ 350 rpm 111

สัญลักษณ์และคำย่อ

A : แฟกเตอร์ความถี่ของการชน

C : ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e : ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 : ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

E_a : พลังงานกระตุ้น (จูลต่อโมล)

k_a : ค่าคงที่ของการดูดซับ (นาที$^{-1}$)

k_d : ค่าคงที่ของการคายซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร·นาที)

k_i : ค่าคงที่ของอัตราการแพร่ภายในโมเลกุลของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม·นาที$^{0.5}$)

k_1 : ค่าคงที่อัตราสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (นาที$^{-1}$)

K_A : ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์

K_F : ค่าคงที่ของสมการฟลอยลิค

n : ค่าคงที่

P : ความดันไอย่อย (บรรยากาศ)

P_0 : ความดันไออิ่มตัว (บรรยากาศ)

q : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_1 : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลสำหรับการดูดซับอันดับหนึ่ง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_2 : ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลสำหรับการดูดซับอันดับสอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)

r_a : อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

r_d : อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

R : ค่าคงที่ของก๊าซ (จูลต่อโมล·เคลวิน)

R^2 : สัมประสิทธิ์ความเบี่ยงเบน

t : เวลา (นาที)

T : อุณหภูมิ (เคลวิน)

θ : สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงาน

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา พบว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสิ่งเจือปนประเภท สารประกอบอินทรีย์ โลหะหนัก สี และอื่น ๆ ลักษณะของน้ำเสียประเภทหนึ่งที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมก็คือ น้ำเสียที่เกิดจากสีย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อม

การกำจัดน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมทำได้หลายวิธี เช่น การย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีววิทยา การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอนด้วยสารเคมี การออกซิไดซ์ และการดูดซับ

ในการกำจัดน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยวิธีการดูดซับ มักนิยมใช้คาร์บอน-กัมมันต์เป็นตัวดูดซับ แต่มีข้อเสียเนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง การนำคาร์บอนกัมมันต์กลับมาใช้ซ้ำต้องใช้พลังงานและทำได้ยาก และในการใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับต้องทำที่ pH ที่เหมาะสมจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับ pH ของน้ำทิ้งก่อนจะปล่อยออกสู่สิ่ง-แวดล้อม ทำให้วิธีการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

โครงงานนี้จึงทำการทดลองศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม Methylene Blue และ Congo Red โดยใช้ตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ต้นข้าวโพด และต้นมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก และมีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังเป็นตัวดูดซับ

2. เพื่อศึกษาผลของชนิดของสีย้อม ความเร็วรอบในการปั่นกวน ขนาดของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และอุณหภูมิในการดูดซับที่มีต่อการดูดซับ

3. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม Methylene Blue และ Congo Red โดยใช้ต้นข้าวโพด และต้นมันสำปะหลังเป็นตัวดูดซับ

2. ทำการทดลองเพื่อหา Adsorption isotherm ของการดูดซับด้วยต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง

3. ศึกษาผลของชนิดของสีย้อม ความเร็วรอบในการปั่นกวน ขนาดของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และอุณหภูมิในการดูดซับที่มีต่อการดูดซับ

4. ศึกษาหาอันดับและค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

1. ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการดูดซับ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสารละลายสีย้อม
2. ศึกษาถึงขั้นตอนการทดลอง และวิธีวิเคราะห์
3. เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี
4. ทำการทดลองเก็บข้อมูล
5. สรุปผลและเขียนรายงานพร้อมข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงาน

1. เข้าใจหลักการ วิธีการ และขั้นตอนในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ

2. ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา และประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารละลายสีย้อมที่ถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

3. เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์

4. เรียนรู้การทำงานเป็นกลุ่ม การวางแผน การควบคุมการทำงาน และการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นขณะดำเนินโครงงาน

บทที่ 2

ทฤษฎี

การดูดซับ คือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารหนึ่งยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกสารหนึ่ง สารที่ไปยึดเกาะอยู่ผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พื้นผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น

2.1 ประเภทของการดูดซับ [1-3]

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

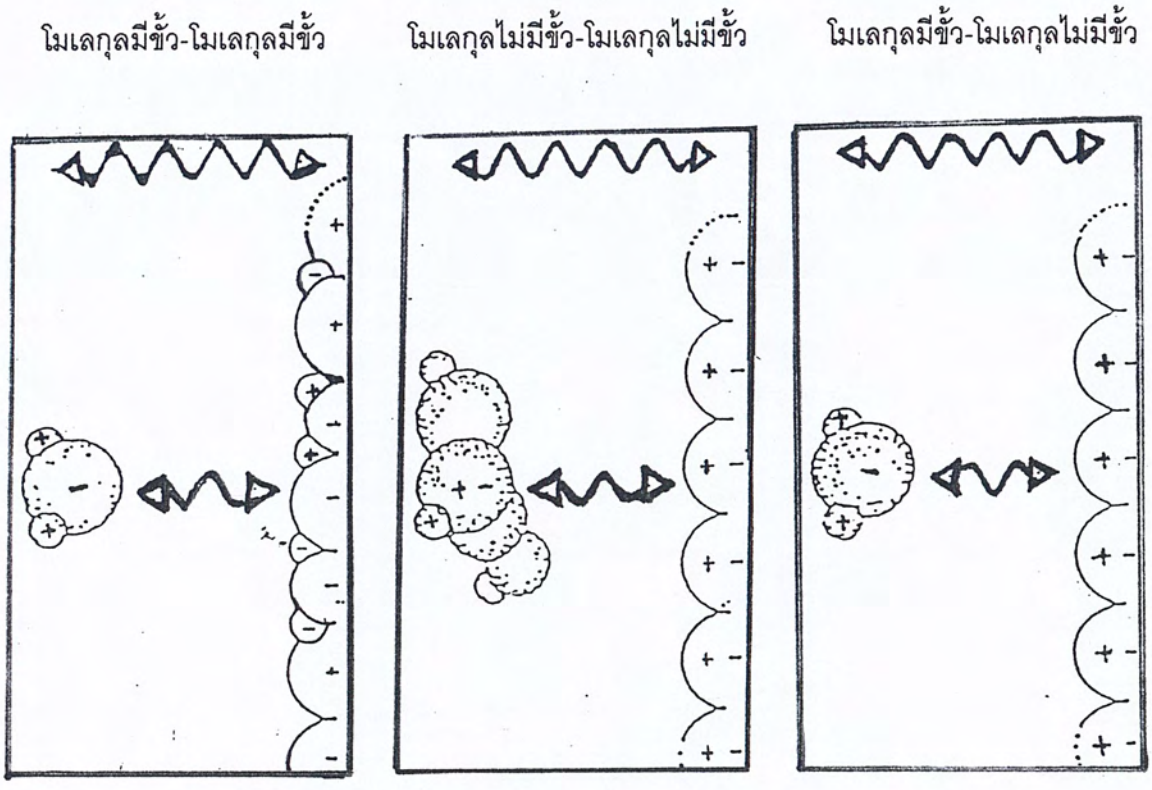
การดูดซับประเภทนี้แรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะเป็นแรงค่อนข้างอ่อน เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงไดโพล–ไดโพล (dipole-dipole forces) เป็นต้น โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม

ลักษณะการเกาะจับด้วยแรงทางกายภาพเกิดจากผล 3 อย่าง ดังรูปที่ 2.1

1. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

2. เกิดจากหลักการที่ว่าโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อน ๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่

3. เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้ามแล้วเกิดการดึงดูดกัน ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.1 การดูดซับในลักษณะต่าง ๆ ด้วยแรงทางกายภาพ [4]

2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

จะเกี่ยวข้องกับแรงหรือพันธะทางเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา การเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล การดูดซับทางเคมีบางครั้งต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้

2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่ว ๆ ไปบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น

3. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี

2.2 กลไกการดูดซับ [3,5-6]

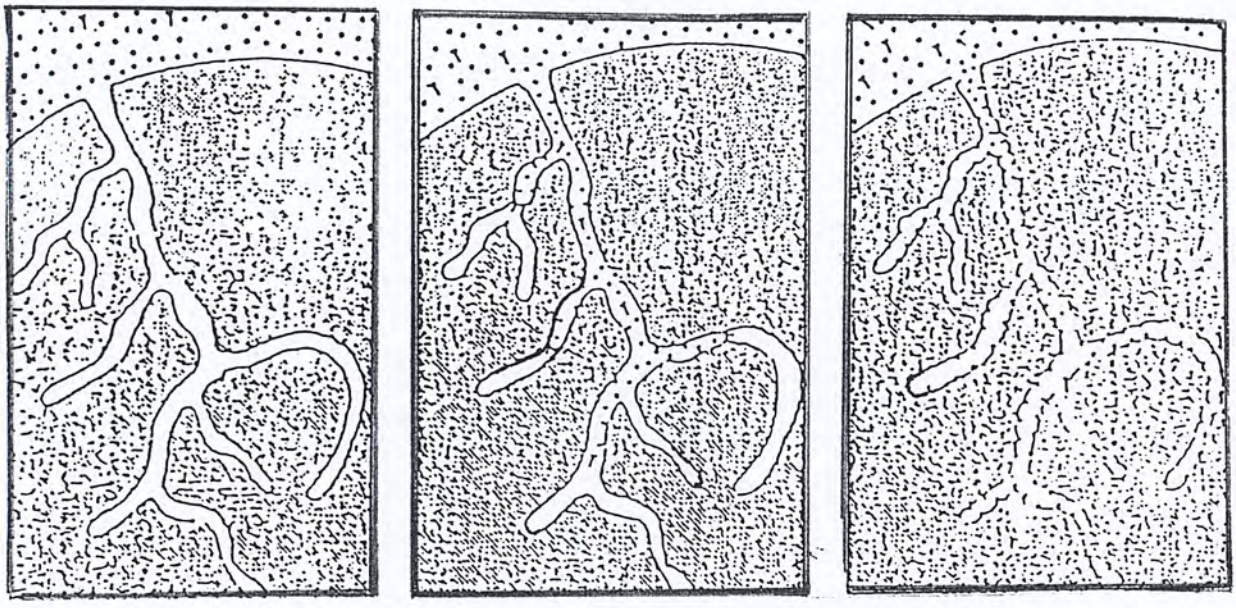
กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือ

ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 เกิดการดูดติดผิวในรูพรุน ระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวตัวดูดซับซึ่งอาจจะเกิดการดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพ หรือทางเคมี หรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน

ระยะที่ 1 ระยะที่ 2 ระยะที่ 3



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ [4]

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors affecting adsorptions) [2,7]

2.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorbent)

2.3.1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure)

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2.3.1.2 ขนาดของตัวดูดซับ (Adsorbent size)

ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

2.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)

2.3.2.1 ความสามารถในการละลาย

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามคำกล่าวข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

2.3.2.2 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.3.2.3 ความมีขั้วของโมเลกุล

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.3.3 ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

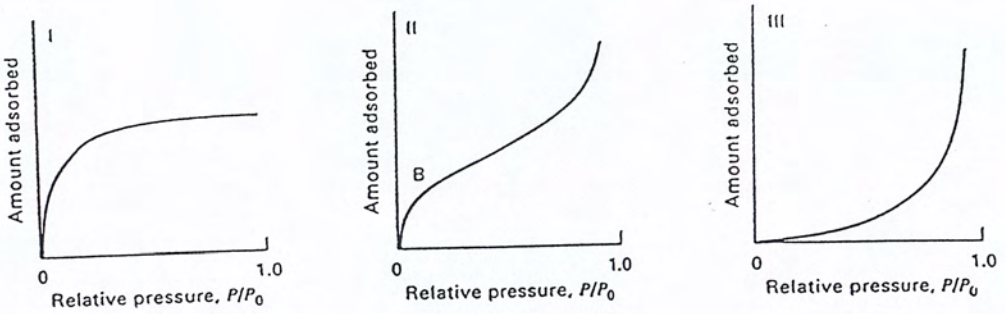
2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms) [1-2,7-8]

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลและที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ไป เขียน กราฟ กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้ไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับสาร และสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ได้

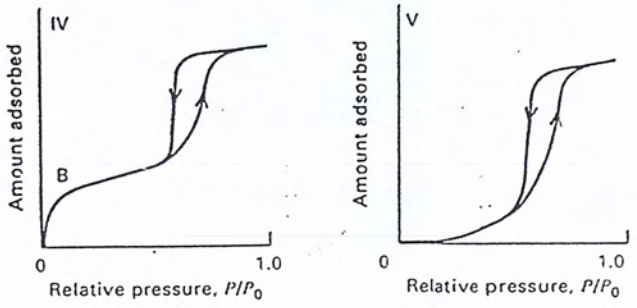
ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มดังนี้

1. Langmuir ได้มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่างของไอโซเทอมแบบนี้จะพบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยมาก เช่น คาร์บอนกัมมันต์ ซิลิกาเจล และซีโอไลท์ การดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก

2. Sigmoid หรือ S-shaped isotherm จะพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ข ที่จุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น



(ก) (ข) (ค)



(ง) (จ)

รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบต่าง ๆ [1]

3. Convex isotherm ที่ไม่มีจุด B จะเป็นแบบที่พบได้ยาก เกิดขึ้นในกรณีที่การดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้ตัวถูกดูดซับไม่เปียกผิวของตัวดูดซับ เช่น ไอน้ำบนกราไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ค

4. เหมือนกับแบบ Sigmoid จะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 2-50 นาโนเมตร ที่ค่า P/P_0 ต่ำ ลักษณะของเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับแบบ Sigmoid เมื่อค่า P/P_0 มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะเกิด Capillary condensation ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis effect ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ง ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรม

5. เหมือนกับแบบ Convex isotherm แต่จะเกิด Capillary condensation ที่ P/P_0 สูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จ ไอโซเทอมชนิดนี้พบได้ยาก

2.5 แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Models for adsorption isotherm)

สามารถใช้ได้กับทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี แต่มีข้อแม้ว่า

1. จะต้องมีสมดุลที่แท้จริง

2. การดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อทำการดูดซับและการคายซับหลาย ๆ ครั้ง

2.5.1 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของทฤษฎีนี้มีแนวความคิดจากแบบจำลองชั้นเดียว ดังนี้

1. ที่ทุก ๆ ตำแหน่งผิวสัมผัส สามารถดูดซับโมเลกุลได้

2. ไม่มีแรงกระทำระหว่างตัวถูกดูดซับ

3. พลังงานและกลไกการดูดซับของทุก ๆ โมเลกุลบนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นเหมือนกัน

4. การดูดซับของโมเลกุลบนแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับ จะเกิดแบบชั้นเดียว

ถ้ากำหนดให้

$$\theta = \frac{q}{q_m} \quad (2.1)$$

โดยที่ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (มิลลิกรัม/กรัม)

θ คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_a = k_a C(1 - \theta) \quad (2.2)$$

โดยที่ k_a คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ (1/นาที)

C คือ ค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_d = k_d \theta \quad (2.3)$$

โดยที่ k_d คือ ค่าคงที่ของการคายซับ (มิลลิกรัม/ลิตร•นาที)

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

$$k_a C(1-\theta) = k_d \theta \quad (2.4)$$

$$\theta = \frac{k_a C}{(k_d + k_a C)} \quad (2.5)$$

ถ้ากำหนดให้

$$K_A = \frac{k_a}{k_d} \quad (2.6)$$

จะได้สมการ

$$q = \frac{q_m K_A C}{1+K_A C} \tag{2.7}$$

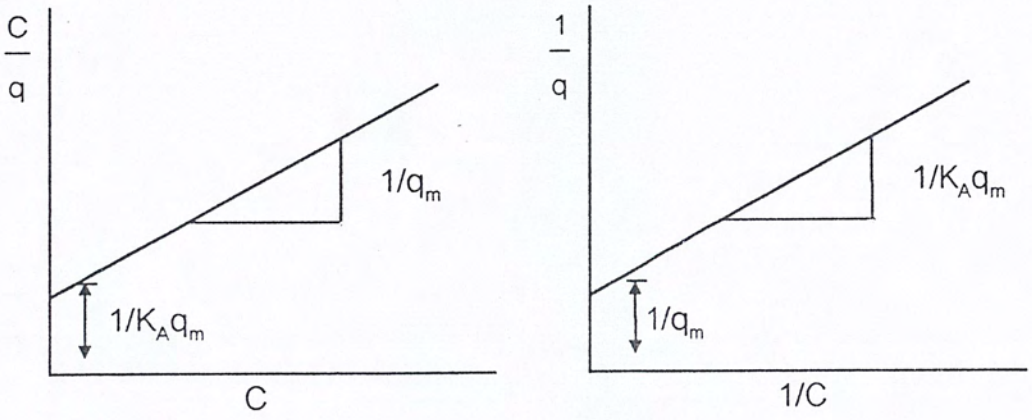
จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_A q_m} + \frac{C}{q_m} \tag{2.8}$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_A q_m}\right)\frac{1}{C} \tag{2.9}$$

ค่า q_m และค่า K_A สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

2.5.2 แบบจำลองการดูดซับฟลอยลิค (Freundlich adsorption isotherm)

ข้อสมมติฐานของ Freundlich isotherm มีว่าความร้อนของการดูดซับจะมีค่าลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้งเมื่อปริมาณผิวหน้าที่ไม่ว่างมีค่าเพิ่มขึ้น

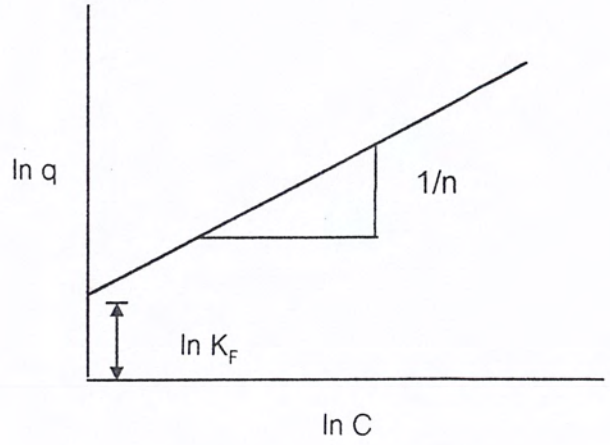
สามารถเขียนสมการการดูดซับของฟลอยลิค ได้ดังนี้

$$q = K_F C^{1/n} \tag{2.10}$$

หรือ

$$\ln q = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C \tag{2.11}$$

จากสมการ (2.11) ถ้าเขียน กราฟระหว่าง $\ln q$ กับ $\ln C$ จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า K_F และ n ได้จากจุดตัดแกนและความชันของเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm

2.6 อัตราการดูดซับ [9-11]

ในการทดลองศึกษาการดูดซับสีย้อม จะใช้แบบจำลอง 3 แบบในการทดสอบ คือ

1. แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
2. แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง
3. แบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับ

2.6.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_1 - q_t) \qquad (2.12)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0 \longrightarrow t = t$

$q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$

$$\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_1}{2.303}t \qquad (2.13)$$

โดยที่ q_1 คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัม/กรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)

t คือ เวลา (นาที)

เมื่อทำการ เขียน กราฟระหว่าง $\log(q_1 - q_t)$ กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_1 ได้จากความชัน

2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_2 - q_t)^2 \qquad (2.14)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0 \longrightarrow t = t$

$q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$

$$\frac{1}{(q_2 - q_t)} = \frac{1}{q_2} + k_2 t \qquad (2.15)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_2^2} + \frac{1}{q_2} t \qquad (2.16)$$

โดยที่ q_2 คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)

q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ(มิลลิกรัม/กรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (1/นาที)

เมื่อทำการเขียน กราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้จากจุดตัดแกน y

2.6.3 แบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับ

สมการแบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับสามารถเขียนได้เป็น

$$q_t = k_i t^{0.5} \qquad (2.17)$$

โดยที่ q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกัม/กรัม)

k_i คือ Intraparticle differential rate constant (มิลลิกรัม/กรัม นาที $^{0.5}$)

เมื่อทำการ เขียน กราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้เส้นตรงที่มีความชัน = k_i

2.7 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ [9-11]

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการดูดซับ พบว่าค่าคงที่อัตราขึ้นกับอุณหภูมิ ในปี ค.ศ. 1889 เอส อาร์เรเนียส (S. Arrhenius) เป็นผู้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ t ดังนี้

$$k = Ae^{-E_a/RT} \tag{2.18}$$

โดยที่ A คือ แฟกเตอร์ความถี่ของการชน

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)

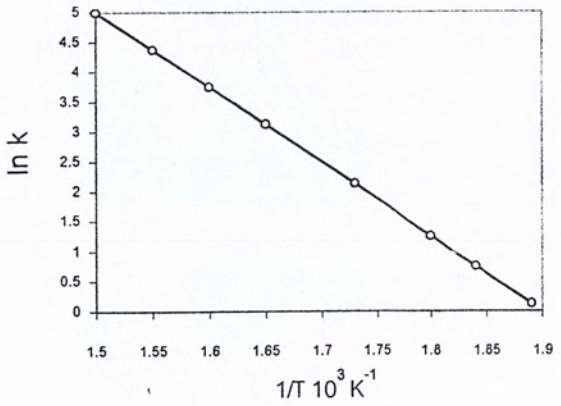
R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่า = 8.3143 (จูล/โมล·เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

เมื่อเขียนสมการที่ (2.18) ในรูปของลอการิทึม จะได้

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \tag{2.19}$$

เมื่อนำสมการ (2.19) มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$ จะได้เส้นตรงตามรูปที่ 2.6 สามารถหาค่า E_a ได้จากความชันของกราฟ



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ

งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับสีย้อม

โดยสามารถแบ่งตามประเภทของตัวดูดซับได้ดังต่อไปนี้

1. คาร์บอนกัมมันต์

- อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ และคณะ [12] ได้ใช้คาร์บอนกัมมันต์ประเภทต่าง ๆ ในการดูดซับสีย้อมผ้าที่มีสีเหลืองเป็นชนิดไดเรคท์ โดยแบ่งคาร์บอนกัมมันต์เป็น 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผง (ทำจากบีทูมินัสและไม้ผสมกะลามะพร้าว) และคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเม็ด (แบ่งเป็น 5 ชนิดคือ ชนิดที่ทำจากไม้ ชนิดที่ทำจากบีทูมินัสที่ผ่านและไม่ผ่านไอน้ำ ชนิดที่ทำจากกะลามะพร้าว และชนิดที่ทำจากลิกไนต์) โดยในการทดลองจะใช้ระบบแบบแบช สำหรับชนิดผงและใช้ระบบแบบไหลผ่านเบดนิ่ง (Flow through fixed bed) สำหรับชนิดเม็ด พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ทั้งชนิดผงและชนิดเม็ดที่ทำจากบีทูมินัสจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าดีที่สุด

- สมชาย เอกธรรมสุทธิ์ [13] ได้ทำการทดลองพบว่า การใช้คอลัมน์คาร์บอนกัมมันต์โดยให้น้ำเสียไหลผ่านชั้นของคาร์บอนกัมมันต์แบบผง เพื่อดูดซับสารอินทรีย์ต่างๆ จะช่วยลดสีจากโรงงานฟอกย้อมได้ดีกว่าวิธีโคแอกกูเลชัน

- วิไลพร วณิชย์โรดม [14] ได้ศึกษาการบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับสารละลายสีสังเคราะห์ประเภทสี Reactive สีแดงและน้ำเงิน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการกำจัดสี และการลดค่า COD จากน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองโดยให้น้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุคาร์บอนกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon) โดยทำการทดลองที่ค่าอัตราน้ำล้นผิวต่าง ๆ คือ 1.17, 2.34 และ 4.68 แกลลอน / นาที-ตารางฟุต พบว่า ที่อัตราน้ำล้นผิวต่ำประสิทธิภาพในการดูดซับสี และ COD จะมีค่าสูง และอายุการใช้งานของชั้นคาร์บอนกัมมันต์จะมีค่ามากกว่าที่อัตราน้ำล้นผิวสูง ที่ความลึกของชั้นถ่านต่าง ๆ กัน (20.0, 50.0 และ 80.0 เซนติเมตร) สำหรับค่าอัตราน้ำล้นผิว 1.17, 2.34, 4.68 แกลลอน / นาที-ตารางฟุต จะพบว่าที่ความลึก 80 เซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสี และการลดค่า COD จะสูงกว่าที่ความลึก 50.0 และ 20.0 เซนติเมตร

- วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ [8] ใช้ถังกรองดูดซับโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเกร็ดเป็นตัวดูดซับกับการใช้ขี้เลื้อยเป็นตัวดูดซับโดยแบ่งสีที่ใช้ในการดูดซับเป็น 4 ชนิด ได้แก่ Acid dyes, Basic dyes, Reactive dyes และ Direct dyes โดยผลจากการ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ทดลองกับสารละลายสีสังเคราะห์พบว่า คาร์บอนกัมมันต์สามารถดูดซับ Basic dyes ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Direct dyes, Reactive dyes และ Acid dyes ตามลำดับ ส่วนขี้เลื่อยสามารถดูดซับสี Basic dyes ได้ดีที่สุด รองลงมา คือ Acid dyes, Direct dyes และ Reactive dyes ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการบำบัดสีจากสารละลายสังเคราะห์พบว่าให้ผลดีกว่าการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมค่อนข้างมาก เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอเป็นสีผสมหลายชนิด ซึ่งมีองค์ประกอบและปริมาณแตกต่างกันไป

- Paschal และ Roy [15] ได้ทำการศึกษาการกำจัด Disperse dyes, Direct dyes, Basic dyes, Acid dyes และ Premetalized dyes ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่ทำมาจากลิกไนต์ ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีถึงร้อยละ 90 และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก

- Ghash และคณะ [16] กล่าวว่า การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์และสี โดยทั่ว ๆ ไปวิธีการกำจัดสีและสารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์-เคมี แม้ว่าระบบกำจัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสีได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการดูดซับด้วยถ่าน (Carbon adsorption) จะตามด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยเคมี (Chemical coagulation) เป็นวิธีที่สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียได้ การรวมกระบวนการทางชีววิทยาและการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) สามารถกำจัดสารเคมีและสีของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าได้

- Chia-Chang Lin และคณะ [17] ใช้ คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดซับสี Basic Yellow dye โดยใช้ระบบหมุนเหวี่ยง ซึ่งจะพบว่าอัตราการดูดซับสามารถควบคุมได้โดย Degree of centrifugal force

- Ernst [18] ได้ทดลองใช้คาร์บอนกัมมันต์ที่ทำมาจากเปลือกถั่วลิสง (Peanut Hulls) ในการกำจัดสีประเภท Direct dyes, Acid dyes และ Basic dyes พบว่า คาร์บอนกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูง และคาร์บอนกัมมันต์ที่ทำจากเปลือกต้นสน (Pinebark) จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า ส่วนคาร์บอนกัมมันต์ที่ทำจากวัสดุของเสียต่าง ๆ เช่น ขี้เลื่อยของไม้สน (Pine Sawdust) ขี้เลื่อยจากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood Sawdust) และ Sewage Sludge จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่างกันแล้วแต่ชนิดของสี

42401

- Mitchell [19] ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่ทำมาจากของเสียทางการเกษตร อุตสาหกรรม และจากชุมชน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดประมาณร้อยละ 50-80

- Villiers [20] ได้ศึกษากระบวนการฟิสิกส์-เคมี ที่ Lebanon (Ohio) โดยใช้ปูนขาวและคาร์บอนกัมมันต์ 3 คอลัมน์เพื่อจุดประสงค์ในการกำจัดสารมลพิษต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดมากที่สุด ผลที่ได้รับคือปูนขาวสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 74 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 75 สารอินทรีย์ร้อยละ 78 และคาร์บอนกัมมันต์สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เพิ่มอีกร้อยละ 20

- Weber [21] ได้ทดลองใช้ระบบกำจัดแบบฟิสิกส์-เคมี โดยใช้ปูนขาวและคาร์บอนกัมมันต์ พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำเสียที่ Ewing-Lawrence (New Jersey) และที่ Blue Plain (Washington D.C.) ได้ร้อยละ 95-98 และที่ Lebanon (Ohio) ได้ร้อยละ 95

2. วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

- G. Mckay และคณะ [22] ศึกษาการนำชานอ้อยมาใช้ในการดูดซับ Basic Blue 69, Basic Red 22, Acid Red 144 และ Acid Blue 25 โดยสามารถดูดซับได้ 158, 77, 23 และ 22 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของขนาดของอนุภาค อุณหภูมิของสารละลายสีย้อม โดยนำวิธี Langmuir, Freundlich และ Jossens isotherm มาใช้ในการคำนวณ

- G. Mckay [23] ได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับสีโดยชานอ้อย สีทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ Basic Blue 69, Basic Red 22, Acid Blue 25 และ Acid Red 114 โดยใช้ระบบแบชแบบมีการปั่นกวน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการปั่นกวน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม มวลของชานอ้อย ขนาดของอนุภาคชานอ้อย และ อุณหภูมิของสารละลายสีย้อมด้วย

- Mchammad S.El และคณะ [24] ใช้ซังข้าวโพดเป็นตัวดูดซับ Atrazon Blue, Maxilon Red, Telon Blue และ Erionyl Red โดยสามารถดูดซับได้ 160, 94.5, 41.4 และ 47.7 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ

- Gang Sun และ Xiangjing Xu [25] ใช้ก้านดอกทานตะวันในการดูดซับสี 2 ประเภทได้แก่ Basic dyes (Methylene Blue และ Basic Red 9) และ Direct dyes (Congo Red และ Direct Blue 71) พบว่าก้านดอกทานตะวันสามารถดูดซับสีประเภท Basic dyes ได้ใน

ปริมาณสูงกว่า Direct dyes มาก นอกจากนี้แกนกลางของก้านดอกทานตะวันซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่มและมีรูพรุนมากก็สามารถดูดซับสีได้ดีกว่าส่วนอื่น ๆ และขนาดของก้านดอกทานตะวันที่ใช้ดูดซับก็มีผล คือ ยิ่งมีขนาดเล็กยิ่งดูดซับได้ดีเพราะมีพื้นที่ผิวมาก

- Mamdouh M. Nassar, Yehia H, Magdy [26] ใช้ผลปาล์มดูดซับสี Basic dyes 3 ชนิด ได้แก่ Yellow dye, Red dye และ Blue dye พบว่าผลปาล์มมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Yellow dye ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Red dye และ Blue dye ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดูดซับ (คิดจากปริมาณที่สามารถดูดซับได้เท่านั้น) พบว่าค่าใช้จ่ายในการดูดซับ Yellow dye เท่ากับ 1.9 % Red dye เท่ากับ 4.4% Blue dye เท่ากับ 7.1% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ

- วิภาดา นวลทวี และคณะ [5] ใช้ผงผักตบชวาในการดูดซับสีไดเรคท์ ซึ่งได้แก่สี Sirius Red F3B (CI 35780), Sirius Red Vioret RL (CI 2540), Sirius Blue S-BRR (CI 34140) และ Sirius Orange K-CF (CI 40215) โดยทำการเปรียบเทียบผลการดูดซับระหว่าง ผักตบชวาและคาร์บอนกัมมันต์(ถ่านไม้โกงกาง) พบว่าผักตบชวาจะมีการดูดซับที่สูงกว่า ยกเว้นสี Sirius Orange K-CF ที่ทำการดูดซับจากความเข้มข้นเริ่มต้น 25.00 ppm ให้เหลือความเข้มข้นน้อยกว่า 4 ppm ถ่านไม้โกงกางจะมีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าสี Sirius Red F3B มีโครงสร้างใหญ่ที่สุดจึงมีประสิทธิภาพในใกล้เคียงกันการดูดซับสีน้อยที่สุด ส่วนสีชนิดอื่น ๆ นั้นมีประสิทธิภาพ ในการดูดซับสี

3. ไม้และขี้เลื่อย

- Poots และคณะ [27] ได้ทำการทดลองใช้ไม้ในการดูดซับสี Telon Blue (Acid Blue 25) โดยทำการศึกษาผลของเวลาในการสัมผัส ขนาดของอนุภาค และความสามารถในการดูดซับ พบว่าแม้ว่าในการดูดซับ Acid dyes ด้วยไม้จะใช้เวลาในการสัมผัสนานกว่าจะถึงสมดุล แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีได้ดี

- Asfour และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาสภาวะสมดุลของการดูดซับสีย้อมประเภทสี Basic dyes โดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เนื้อแข็งเป็นสารดูดซับ โดยทำการทดลองเป็น 2 ชุด ให้มีขนาดอนุภาคและอุณหภูมิต่างกัน พบว่าการดูดซับของสีย้อมประเภทสี Basic dye โดยใช้ขี้เลื่อยเป็นสารดูดซับสามารถแสดงความสัมพันธ์ทางไอโซเทอม (Isotherm) ของ Langmuir และ Freundlich ได้เป็นอย่างดี และความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดอนุภาคลง และเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายขึ้น นอกจากนี้ขี้เลื่อยยังมีราคาเพียงร้อยละ 8.4 ของราคาคาร์บอนกัมมันต์

- Asfour และคณะ [28] ได้ทำการทดลองกำจัดสีย้อมประเภทสี Basic dyes โดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เนื้อแข็งเป็นสารดูดซับ พบว่าที่อุณหภูมิ 80 °C การกำจัดสีจะใช้เวลา 100 นาที โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่ใช้เท่ากับ 200 มิลลิกรัม/ลิตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 °C เป็น 80 °C เวลาในการสัมผัส (Contact time) จะลดลงร้อยละ 44

- Lee Aik [29] ได้ทดลองหาผลของการใช้ขี้เลื่อยเป็นสารดูดซับ เพื่อดูดซับสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ซึ่งเป็นวิธีบำบัดแบบฟิสิกส์-เคมี สีย้อมที่ใช้คือ Congo Red ซึ่งเป็นสีประเภท Direct dye ทำการทดสอบกับไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง โดยแสดงผลการกำจัดสีในเทอมของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคลดลง และความสามารถในการดูดซับเมื่อใช้ไม้เนื้อแข็งจะสูงกว่าใช้ไม้เนื้ออ่อนเป็นสารดูดซับ

4. วัสดุอื่น ๆ

- พัชรี คำธิตา และคณะ [30] ใช้ดินฟอกสีที่ใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันถั่วเหลืองมาผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันออกด้วยสารละลายเฮกเซนแล้วนำมาใช้ดูดซับสีอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ Basic Blue, Basic Yellow, Acid Blue และ Acid Red โดยพบว่าดินฟอกสี HSBE มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes ได้ดีกว่า Acid dyes โดยสภาวะที่เป็นกลางและเบส เหมาะสมกับการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes ในขณะที่สภาวะที่เป็นกรดเหมาะต่อการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Acid dyes สำหรับปริมาณดินฟอกสี HSBE ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes คือ 5 กรัม และสำหรับ Acid dyes คือ 50 กรัม

- G.Mckay และคณะ [31] ใช้ดินเผา (Fired Clay) และ Fuller's earth ในการดูดซับสี Astrazone Blue (Basic Blue 69) และ Telon blue (Acid Blue 25) โดยอัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดย Boundary layer film

- กานดา ใจดี [32] ใช้ไคโตแซนที่สกัดจากเปลือกกุ้งมาทำการดูดซับสี โดยสีที่ใช้ได้แก่ สี DIANIX RED 2 BSL-FS 150 Dystar, Dystar Thai Ltd. พบว่าหากนำไคโตแซนมาผสมกับผงคาร์บอนกัมมันต์ 3% โดยน้ำหนัก จะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโดยไคโตแซนมาผสมกับผงคาร์บอนกัมมันต์ 3% โดยน้ำหนัก กับการใช้ผงคาร์บอนกัมมันต์อิสระเป็นตัวดูดซับจะได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าสำหรับสาร

ละลายสีย้อมผ้าที่มีสภาพเป็นกรด ทั้งไคโตแซนและคาร์บอนกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น

- G.Mckay [33] ใช้ Chitin ในการดูดซับสีย้อม 4 ชนิดได้แก่ Acid Blue 25, Acid Blue 158, Mordant Yellow 5 และ Direct Red 84 ซึ่งพบว่าที่ 20 °C มีปริมาณการดูดซับสีดังนี้ 186, 222, 51 และ 46 มิลลิกรัมของสีย้อม / กรัมของ Chitin ตามลำดับ

- V.J.P. Poots และคณะ [27] ใช้ Peat (เป็นถ่านหินร่วนที่เกิดจากต้นไม้ที่เกิดการทับถมกัน) ในการดูดซับสี Telon Blue (Acid Blue 25) โดยได้ศึกษาทั้ง Langmuir และ Freundlich isotherm ผลของเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นและขนาดของอนุภาค peat โดยใช้ระบบ Fixed bed ต่ออนุกรมกัน

- Y.S. Ho และ G. Mckay [9] ใช้ peat ในการดูดซับสี Basic Blue 69 และ Acid Blue 25 โดยศึกษากลไกการดูดซับในเทอมของ Pseudo-second order และ First order โดยใช้ระบบแบชในการทดลอง ซึ่งสามารถทำนายค่าคงที่ในการดูดซับ ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุล และอัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เป็นผลจากการปั่นกวนได้

- อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์ [7] ใช้ขี้เถ้าลอยลิกไนต์ในการดูดซับสีจากน้ำสีสังเคราะห์ โดยเตรียมจากสีย้อมผ้าประเภทต่าง ๆ ดังนี้ Acid dyes (Nylosan blue N-GL และ Telon Blue AFN), Reactive dyes (Drim. Blue X-3LR และ Levafix Blue E-GRN), Sulphur dyes (Sulpholsol Black SG), Direct dyes (Indosol Rubine SF-RGN และ Sirirus Supra Red F3B), Basic dyes (Apollofix Red SF-3B), Disperse dyes (Foron Blue S-R) และ Pigment dyes (Acramin Blue FFG) โดยพบว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายสีในช่วง 4-8 ไม่ค่อยมีการดูดซับสียกเว้น Acid dyes มีแนวโน้มจะถูกดูดซับได้ดีในช่วงที่เป็นกรด ส่วนการเพิ่มของอุณหภูมิในการทดลองจะพบว่า ทำให้การดูดซับสีดีขึ้นเล็กน้อยถึงดีมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีแต่ละชนิด และพบว่าขี้เถ้าลอยลิกไนต์สามารถดูดซับสีส่วนใหญ่ได้ดี เมื่อนำไปใช้ในระบบ Continuous treatment แต่เมื่อนำขี้เถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้จริงในการดูดซับสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม กลับพบว่าสามารถลดความเข้มสีที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งได้เพียงเล็กน้อย และมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งเป็นค่าที่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้

บทที่ 3

การทดลอง

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
2. เครื่องกวนมอเตอร์ (Motor stirrer)
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. เครื่องปั่นสาร (Blender)
5. เครื่องคัดขนาดตะแกรงร่อน
6. เครื่องเขย่า (Shaker)
7. ปิเปต (Pipet) ขนาด 1, 5, 10, 50 และ 100 มิลลิลิตร
8. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 600 และ1000 มิลลิลิตร
9. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร
10. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 10, 25, 50, 100, 250 และ 1000 มิลลิลิตร
11. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
12. แท่งแก้วคน (Stirring rod)
13. ช้อนตักสาร (Spatula)
14. หลอดหยด (Dropper)
15. ขวดฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)
16. กระดาษกรอง
17. ถังปั่นกวน (Mixing tank)
18. หลอดทดลอง (Test tube)
19. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

20. เครื่องอังน้ำ (Water bath)
21. พาราฟิน (Paraffin)
22. ตู้อบ (Oven)
23. โถทำแห้ง (Desiccator)

2. วัสดุและสารเคมี

1. ต้นข้าวโพด
2. ต้นมันสำปะหลัง
3. ผงสีไดเรคท์ (Congo Red)
4. ผงสีเบสิค (Methylene Blue)
5. น้ำกลั่น

การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ

1. นำต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังมาล้างให้สะอาด แล้วหั่นเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง

2. นำส่วนที่แห้งมาปั่นโดยใช้เครื่องปั่นสาร แล้วนำไปล้างโดยใช้น้ำกลั่น จนกว่าสีของน้ำล้างที่ได้จะใส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะได้ตัวดูดซับที่แห้ง

3. นำตัวดูดซับที่ได้มาคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดตะแกรงร่อน แล้วเก็บตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60 และ Mesh number 60-100 ไว้ในโถทำแห้ง (Desiccator) เพื่อใช้ทำการทดลองต่อไป

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษา Adsorption isotherm

1. เตรียมสารละลายสี Methylene Blue และ Congo Red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ตั้งแต่ 10 ถึง 1000 ส่วนในล้านส่วน) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

2. นำสารละลายที่เตรียมได้เข้าเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส วางทิ้งไว้จนอุณหภูมิของสารละลายคงที่

3. ชั่งตัวดูดซับ (ต้นข้าวโพดหรือต้นมันสำปะหลัง) ขนาด Mesh number 20-60 หนัก 0.20 กรัม ใส่ลงในสารละลายแต่ละขวด ปิดขวดรูปชมพู่ด้วยจุกยาง แล้วตั้งอัตราการเขย่าที่ 110 Hub/min

4. ใช้เวลาเขย่า 5 วัน หลังจากนั้นนำส่วนที่เป็นสารละลายไปวัดค่าดูดกลืนแสง

การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม แบ่งเป็น

การศึกษาผลของความเร็วรอบในการปั่นกวน

1.1 นำสารละลายสี Methylene Blue และ Congo Red ความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ใส่ลงในถังปั่นกวนดังรูปที่ 3.1 ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น จากนั้นเปิดให้ใบพัดมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที

1.2 ชั่งตัวดูดซับ ขนาด Mesh number 20-60 หนัก 5.00 กรัม ใส่ลงในถังปั่นกวนพร้อมกับเริ่มจับเวลา แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงจนครบเวลา 3 ชั่วโมง

1.3 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.1-1.2 แต่เปลี่ยนความเร็วรอบในการปั่นกวนเป็น 450 และ 500 รอบต่อนาที ตามลำดับ

1.4 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_0) กับเวลา (t) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับเวลา (t)

การศึกษาผลของขนาดตัวดูดซับ

2.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในตอนที่ 1 ข้อที่ 1.1-1.2 โดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 350 รอบต่อนาที แต่เปลี่ยนขนาดของตัวดูดซับ (ต้นข้าวโพดหรือต้นมันสำปะหลัง) จากขนาด Mesh number 20-60 เป็นขนาด Mesh number 60-100

2.2 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_o) กับเวลา (t) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับเวลา (t)

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

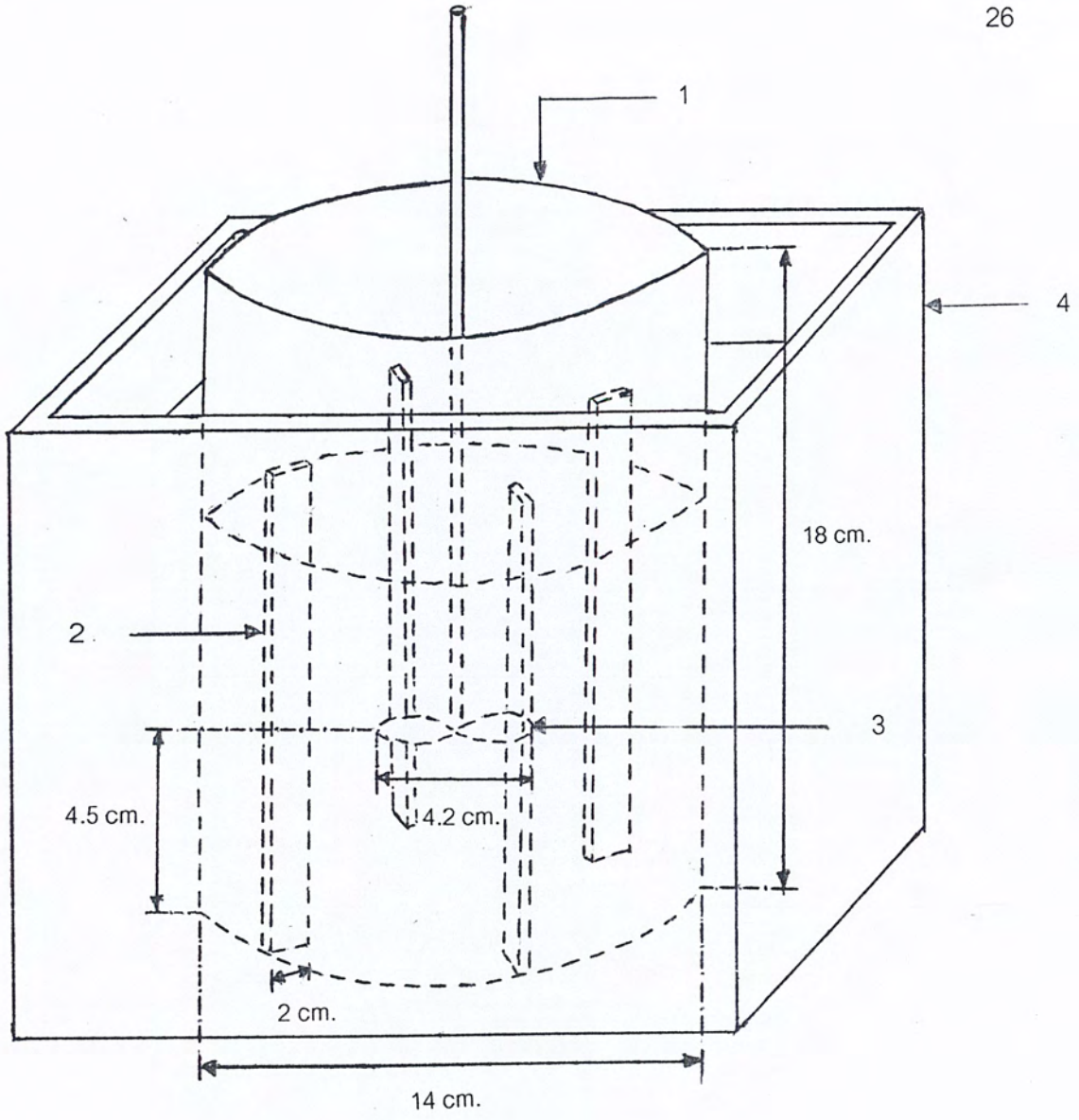
3.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในตอนที่ 1 ข้อที่ 1.1-1.2 โดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 350 รอบต่อนาที แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมจาก 100 ส่วนในล้านส่วน เป็น 200 และ 300 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

3.2 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_o) กับเวลา (t) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับเวลา (t)

การศึกษาผลของอุณหภูมิ

4.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในตอนที่ 1 ข้อที่ 1.1-1.2 โดยใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 350 รอบต่อนาที แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายเป็น 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องอังน้ำในการควบคุมอุณหภูมิ

4.2 นำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C/C_o) กับเวลา (t) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q) กับเวลา (t)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. ถังปั่นกวน (Mixing tank)
   - สูง 18 cm.
   - เส้นผ่าศูนย์กลาง 14 cm.
2. บัฟเฟิล (Baffle)
   - สูง 13 cm.
   - กว้าง 20 cm.
   - หนา 0.2 cm.
3. ใบพัดแบบใบพัดเรือ (propeller)
4. เครื่องอังน้ำ (Water bath)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษา Adsorption isotherm

Adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 จะพบว่า

4.1.1 ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังสามารถดูดซับสารละลายสี Methylene Blue ได้ดีกว่าสารละลายสี Congo Red เนื่องจากสารละลายสี Methylene Blue เป็นสารละลายสีประเภทเบส เมื่อแตกตัวในน้ำจะให้โครงสร้างที่เป็นประจุบวก ในขณะที่ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังซึ่งมีโครงสร้างเป็นเซลลูโลสจะแตกตัวในน้ำแล้วให้โครงสร้างที่เป็นประจุลบ ทำให้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังสามารถดูดซับสารละลายสี Methylene Blue ได้ดีกว่าสารละลายสี Congo Red ที่แตกตัวให้ประจุลบ

4.1.2 ต้นข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue และสารละลายสี Congo Red ได้ดีกว่าต้นมันสำปะหลัง เพราะเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพแล้วพบว่าต้นข้าวโพดมีโครงสร้างเป็นรูพรุนสูงกว่าต้นมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าเมื่อทำการลดขนาดของตัวดูดซับจาก Mesh number 20-60 เป็นขนาด Mesh number 60-100 พบว่าต้นมันสำปะหลังจะมีความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมสูงขึ้น แต่ต้นข้าวโพดจะมีความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมลดลง ทั้งนี้เนื่องจากต้นมันสำปะหลังเมื่อมีขนาดเล็กลงจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับสารละลายสีย้อมได้มากขึ้น ในขณะที่ต้นข้าวโพดมีโครงสร้างเป็นรูพรุนสูงพื้นที่ผิวจึงไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับมากนัก

นำข้อมูลจาก Adsorption isotherm ในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ไป เขียน กราฟเพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง Langmuir isotherm และแบบจำลอง Freundlich isotherm

โดยแบบจำลอง Langmuir isotherm จะ เขียน ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือต่อปริมาณการดูดซับ (C/q) กับความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ (C) ตามสมการที่ (2.8) กราฟที่ เขียน ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.5 จากกราฟจะสามารถหาปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับสูงสุด (q_m) ได้จากความชันของกราฟและสามารถหาค่าคงที่ของ Langmuir (K_A) ได้จากจุดตัดของกราฟ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

แบบจำลอง Freundlich isotherm จะเขียนระหว่างล็อกการิทึมของปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (ln q) และล็อกการิทึมของความเข้มข้น (ln C) ตามสมการที่ (2.11) สามารถหาค่าคงที่ของ Freudlich (K_F และ n) ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่า R^2 จะพบว่า Adsorption isotherm ที่ได้จากการทดลองจะใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Langmuir มากกว่าแบบจำลองของ Freundlich ซึ่งปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับสูงสุด (q_m) ของสารละลายสี Methylene Blue จะมีค่าสูงกว่าสารละลายสี Congo Red และเมื่อพิจารณาที่ขนาดตัวดูดซับต่างกัน ต้นมันสำปะหลังจะมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลง ในขณะที่ต้นข้าวโพดจะมีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อมีขนาดเล็กลง

4.2 การศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม

4.2.1 การศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับ

การทดลองจะใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนเป็น 350, 450 และ 500 รอบต่อนาที โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm อุณหภูมิ 25 °C ตัวดูดซับมีขนาด Mesh number 20-60 ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 – 4.10 และภาคผนวก จ

พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการปั่นกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับสารละลายสี Congo Red จนถึงสมดุลลดลง หรืออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8

การดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยใช้ต้นข้าวโพดเป็นตัวดูดซับ (รูปที่ 4.9) จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการดูดซับสารละลายสี Congo Red แต่การดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยใช้ต้นมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนต่ำ อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับจะสูงกว่าที่ความเร็วรอบการปั่นกวนสูง (รูปที่ 4.10) ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ต่างจากกรณีอื่น ๆ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7–4.10 จะพบว่าส่วนใหญ่การดูดซับที่ความเร็วรอบการปั่นกวน 350, 450 และ 500 รอบต่อนาที จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งแสดงว่าความเร็วรอบในช่วงนี้ไม่มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับสารละลายสี เพราะความเร็วรอบในช่วงนี้จะลดความหนาของชั้นฟิล์มของตัวดูดซับให้เหลือน้อยที่สุด เป็นการลดผลของขั้นตอนการแพร่ของโมเลกุลของสารละลายสีไปยังตัวดูดซับให้เหลือน้อยที่สุด

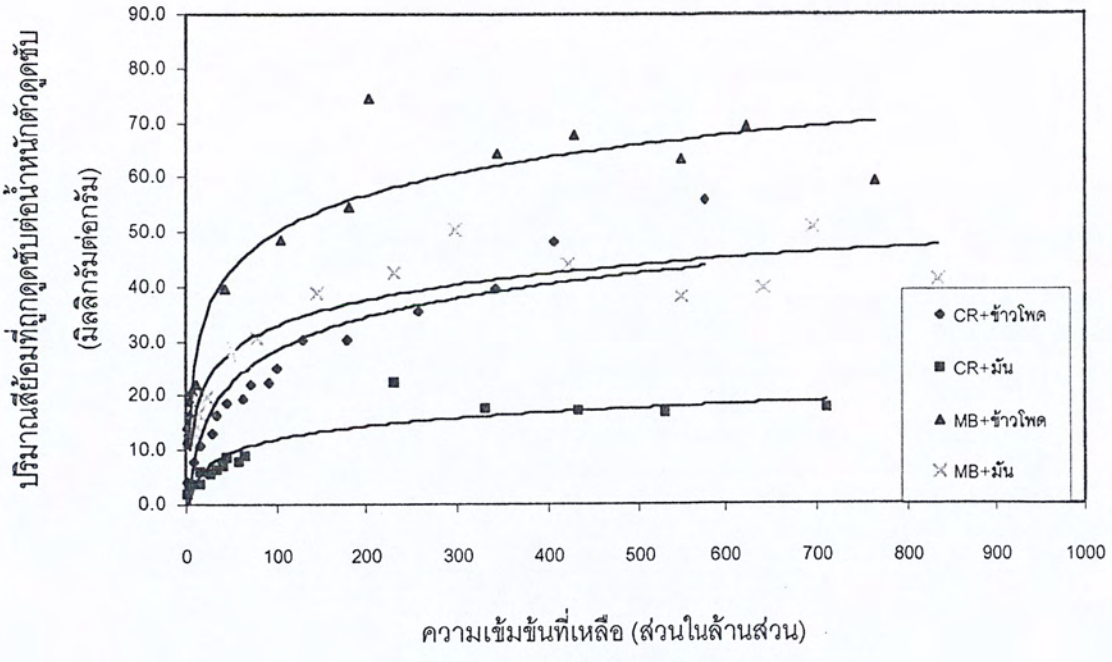
ดังนั้นในการทดลองศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับในการทดลองตอนต่อไป จะใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 350 รอบต่อนาที

4.2.2 การศึกษาผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับ

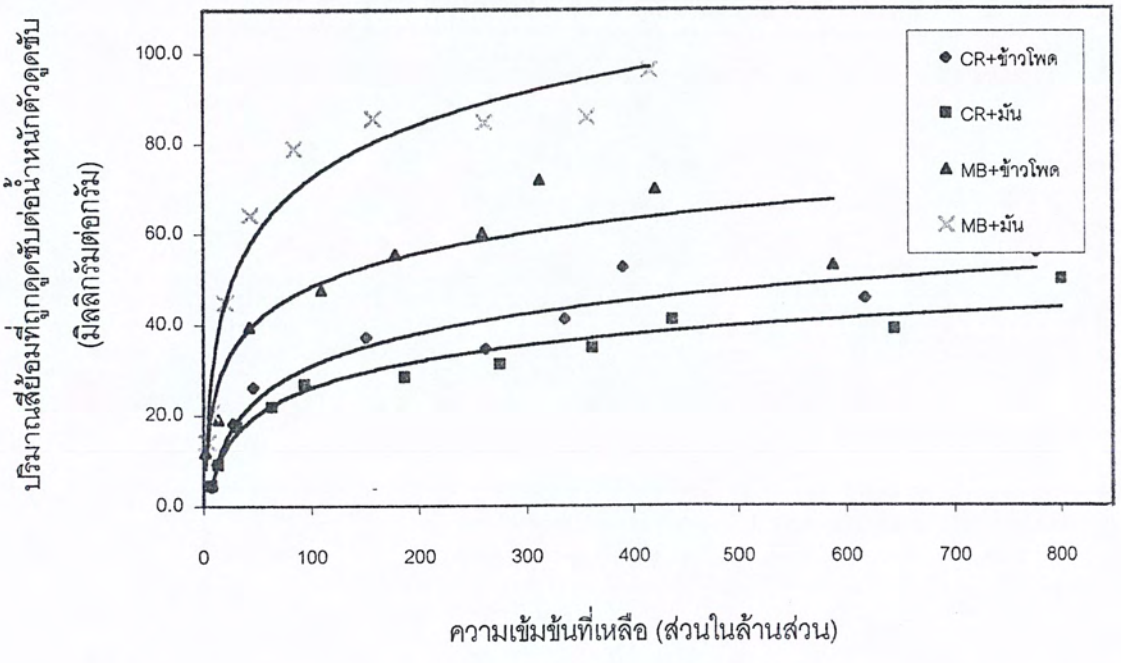
การทดลองจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 100 ppm ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 °C ขนาดของตัวดูดซับ Mesh number 20-60 และ Mesh number 60-100 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11-4.14 และภาคผนวก ฉ

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับสารละลายสี Congo Red ของต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังลดลง เพราะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับสูงขึ้น

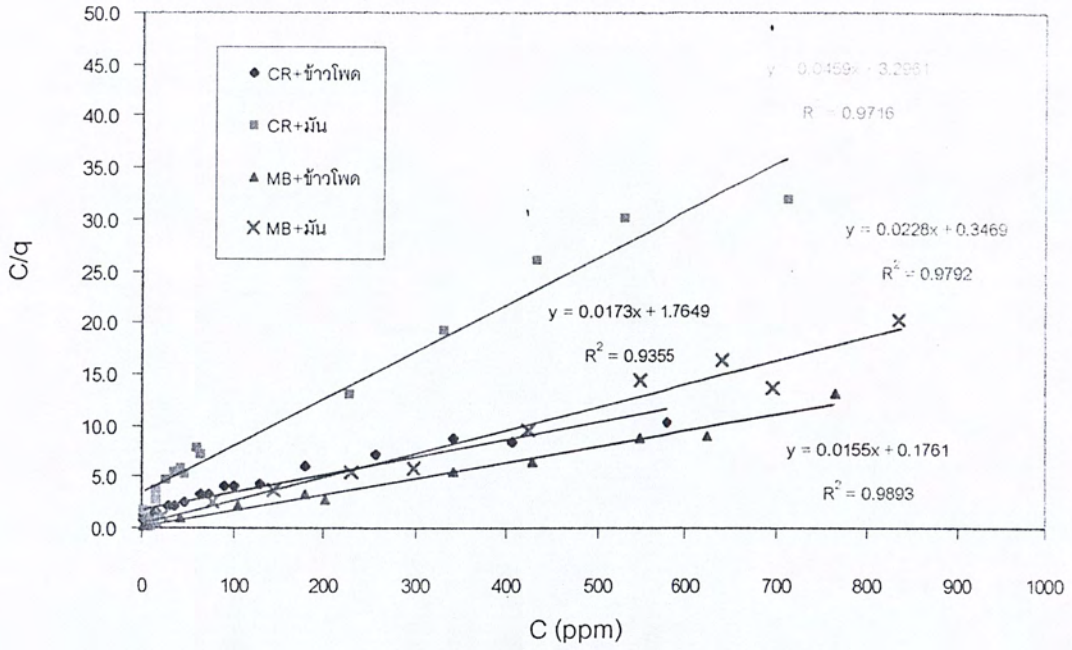
อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue ของต้นมันสำปะหลังจะสูงขึ้นเมื่อขนาดต้นมันสำปะหลังเล็กลง แต่อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของต้นข้าวโพดที่ขนาดเล็กจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ขนาดใหญ่



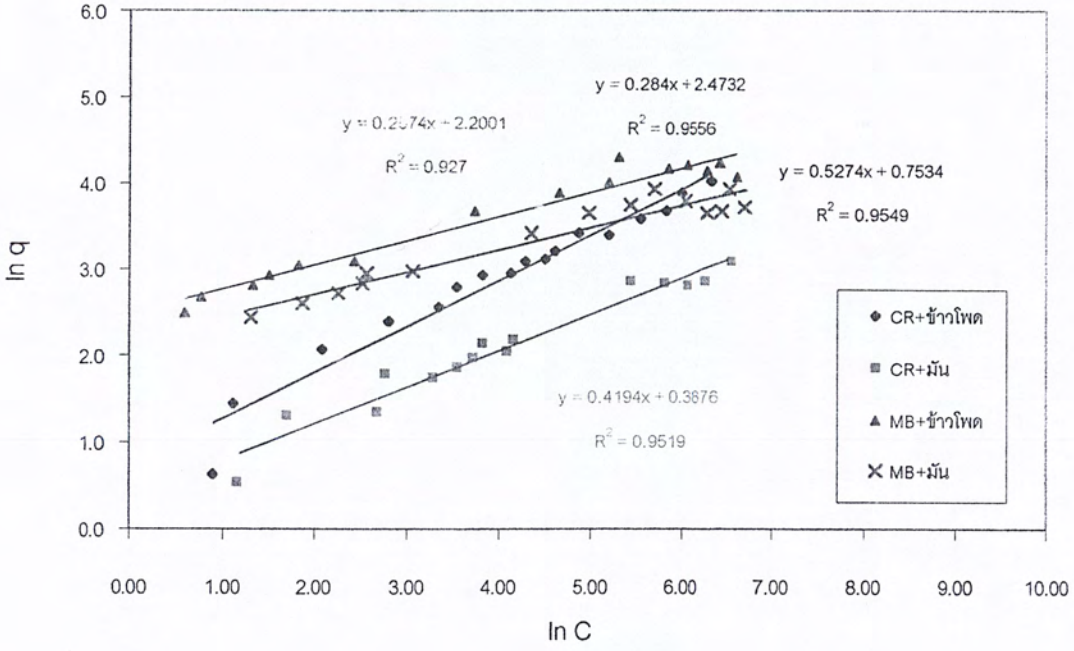
รูปที่ 4.1 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60 ที่อุณหภูมิ 35 °C



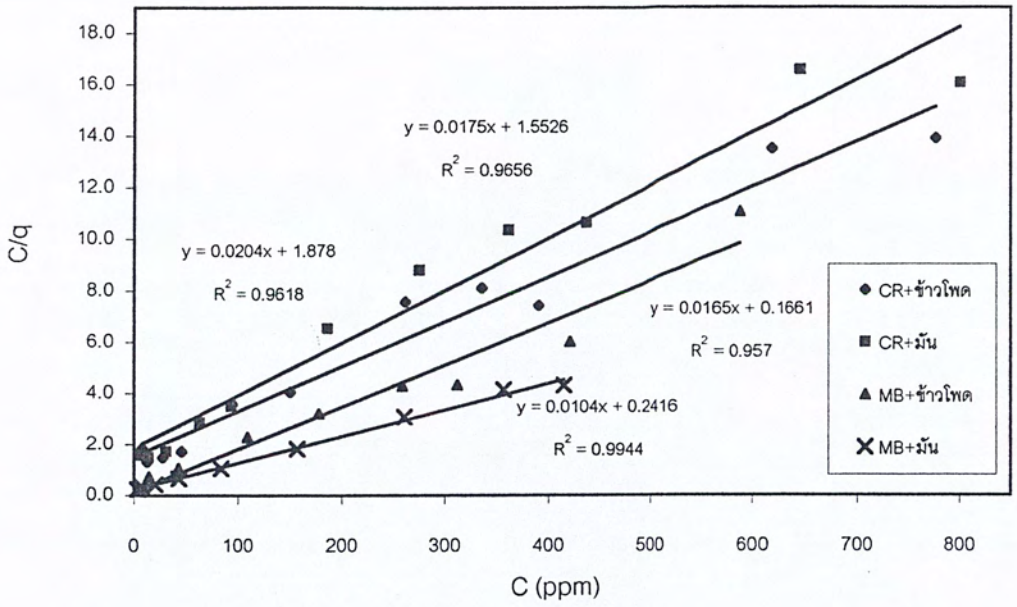
รูปที่ 4.2 Adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 60-100 ที่อุณหภูมิ 35 °C



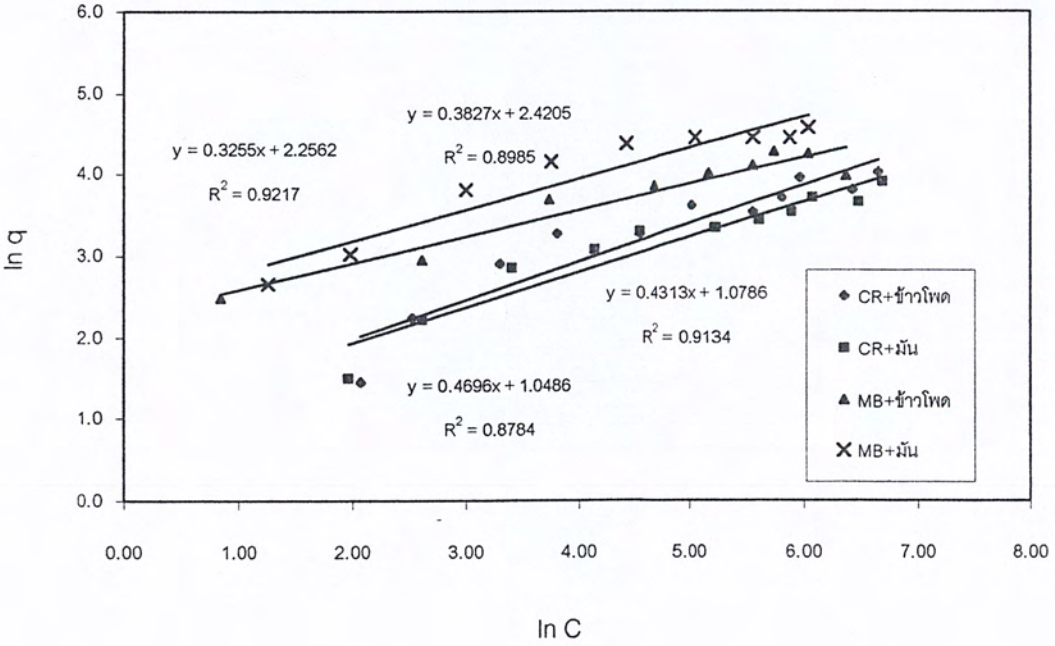
รูปที่ 4.3 Langmuir adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 20–60



รูปที่ 4.4 Freundlich adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60



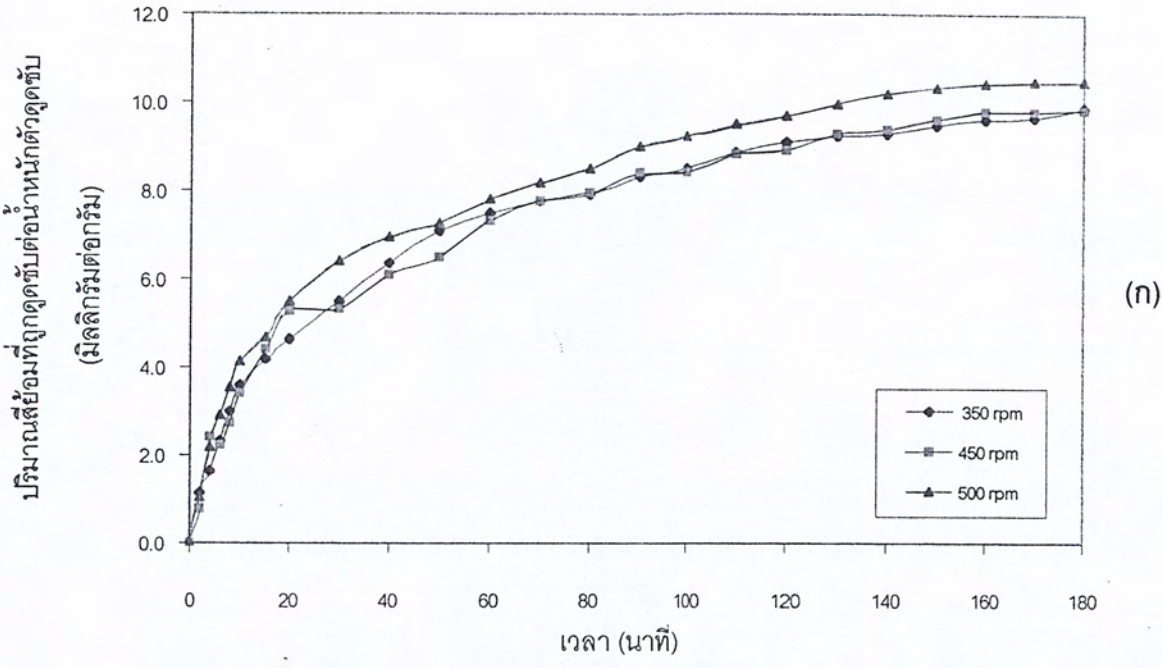
รูปที่ 4.5 Langmuir adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 60-100



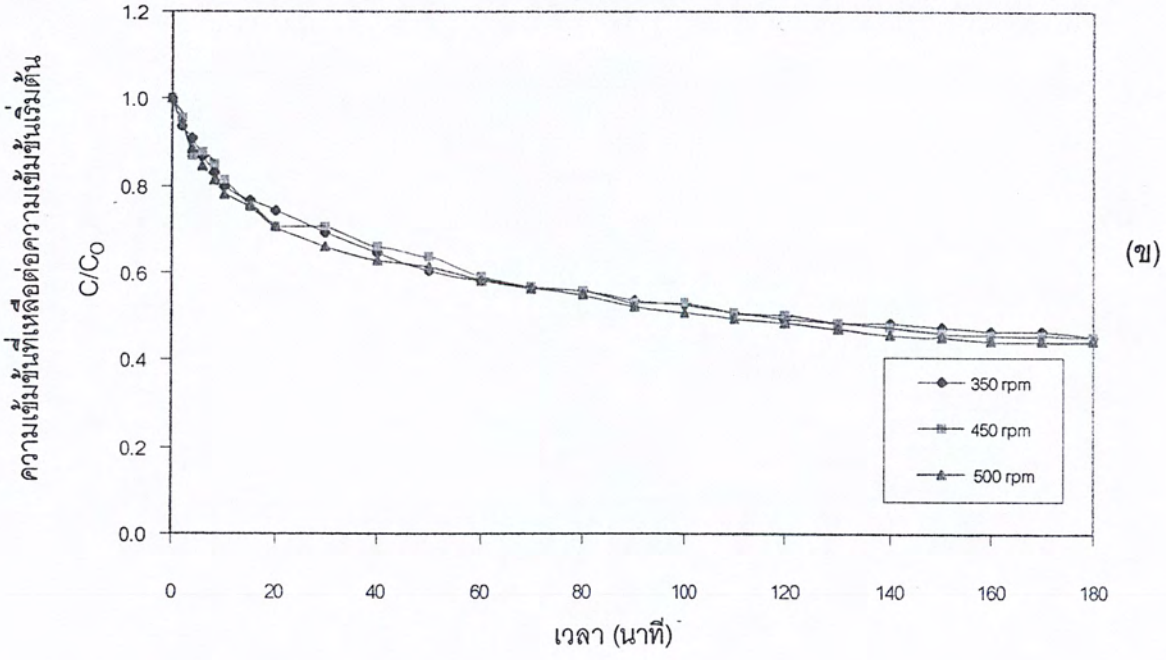
รูปที่ 4.6 Freundlich adsorption isotherm ของตัวดูดซับขนาด Mesh number 60-100

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของสมการ Langmuir และ สมการ Freundlich

ชนิดของตัวดูดซับ	ชนิดของสี	Langmuir constant			Freundlich constant		
		K_A	q_m	R^2	K_F	n	R^2
ข้าวโพด ขนาด	Congo Red	0.010	57.803	0.936	2.124	1.896	0.955
Mesh number 20-60	Methylene Blue	0.003	64.516	0.989	11.857	3.521	0.956
ข้าวโพด ขนาด	Congo Red	0.012	57.470	0.966	2.34	2.125	0.878
Mesh number 60-100	Methylene Blue	0.099	60.606	0.957	9.547	3.072	0.922
มันสำปะหลัง ขนาด	Congo Red	0.014	21.786	0.972	1.473	2.384	0.952
Mesh number 20-60	Methylene Blue	0.008	43.860	0.979	9.025	3.885	0.927
มันสำปะหลัง ขนาด	Congo Red	0.011	48.780	0.962	2.935	2.317	0.913
Mesh number 60-100	Methylene Blue	0.041	97.087	0.994	10.011	2.464	0.884



(ก)

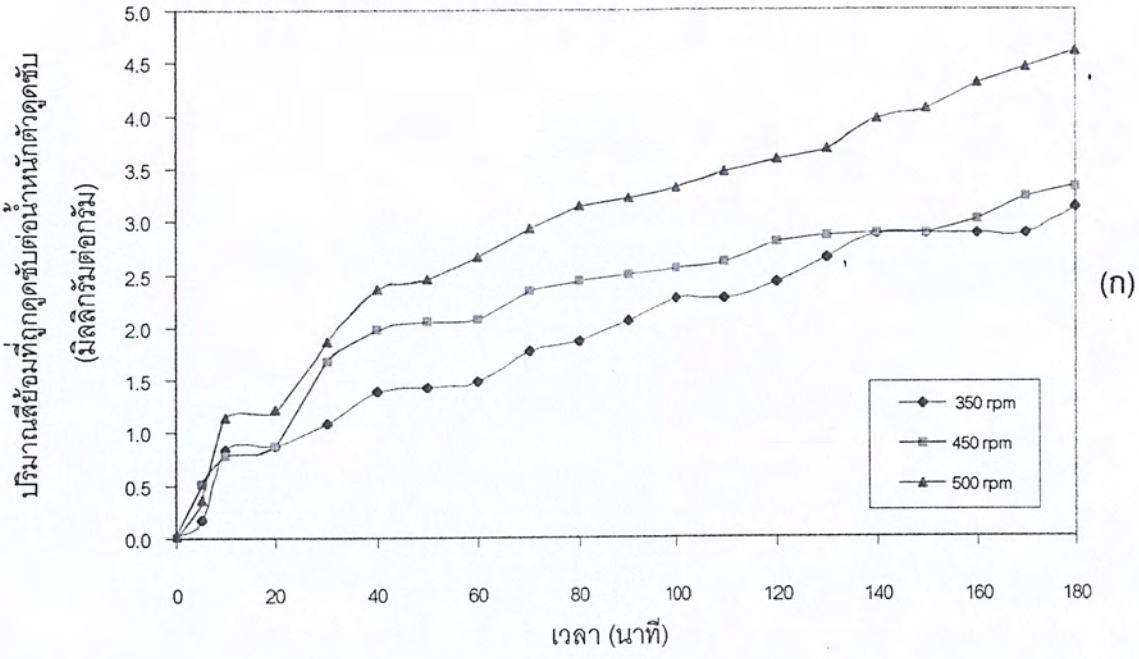


(ข)

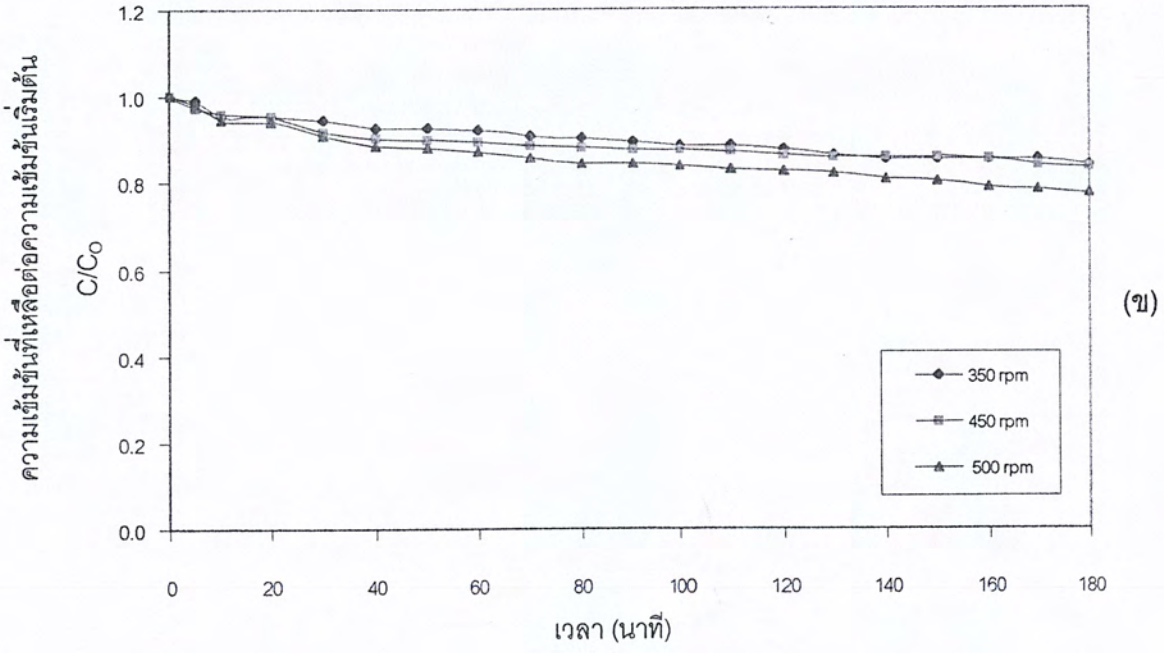
รูปที่ 4.7 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



(ก)

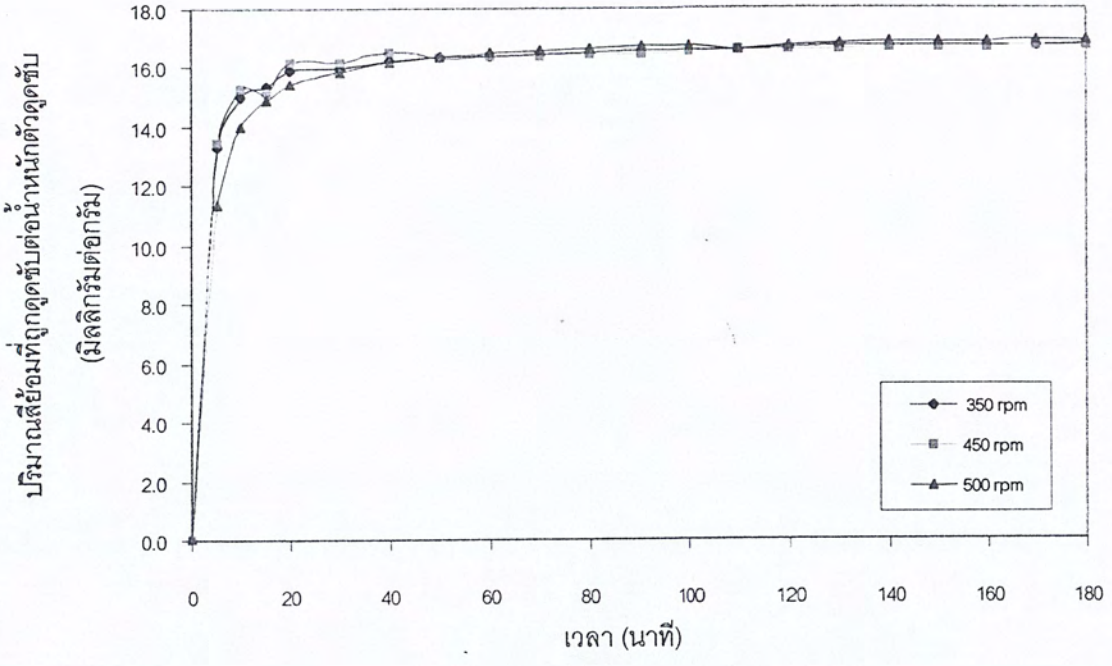


(ข)

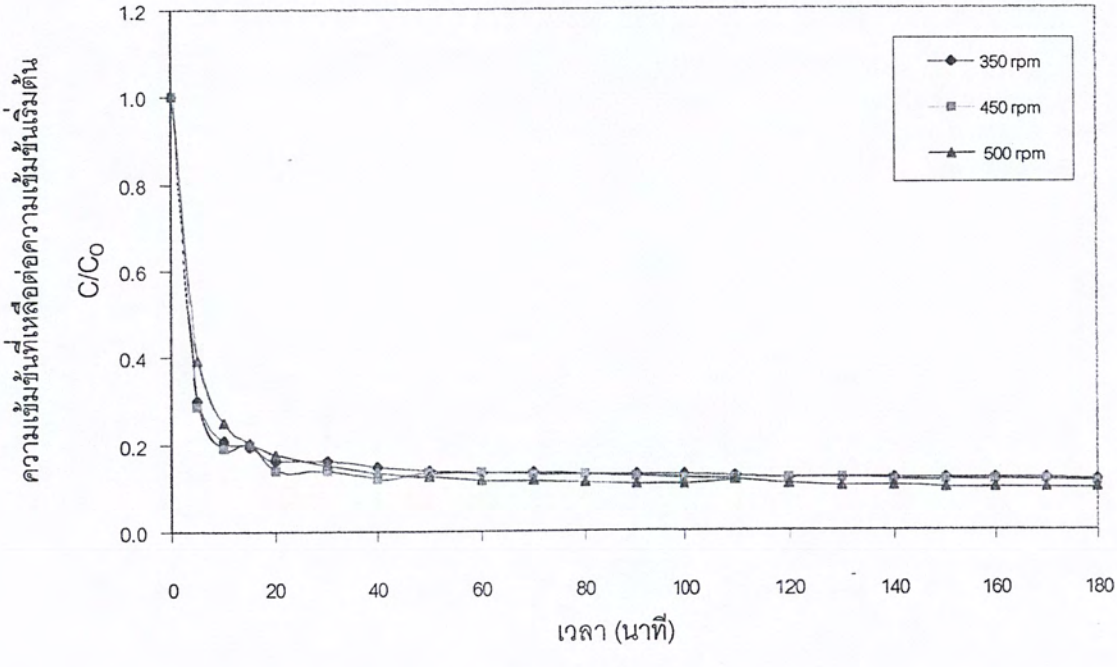
รูปที่ 4.8 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



(ก)

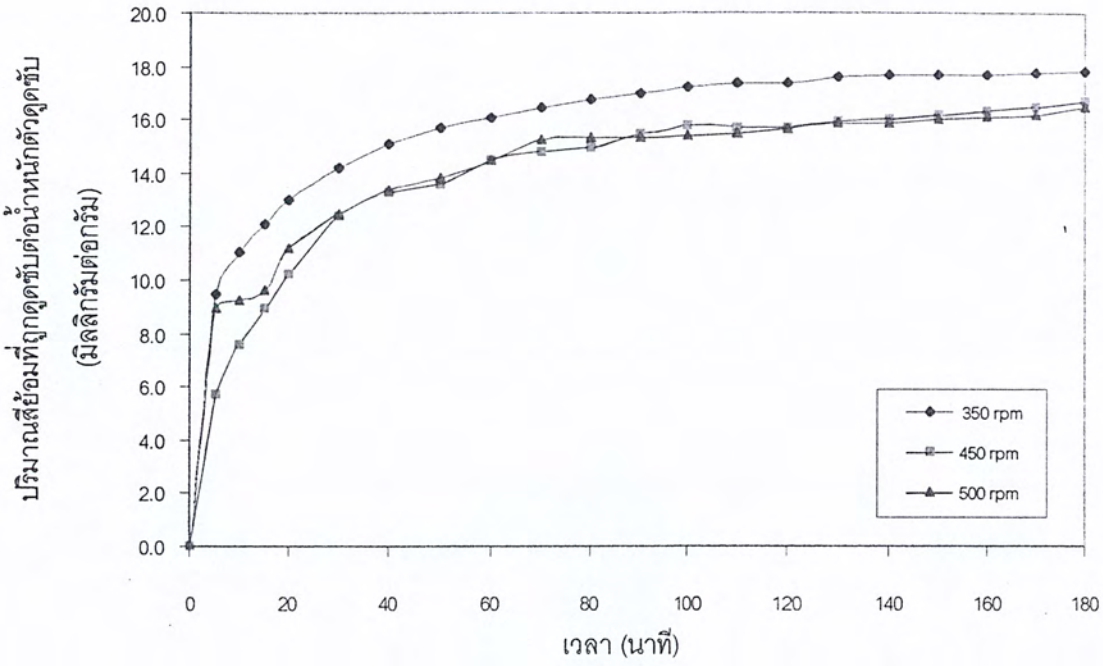


(ข)

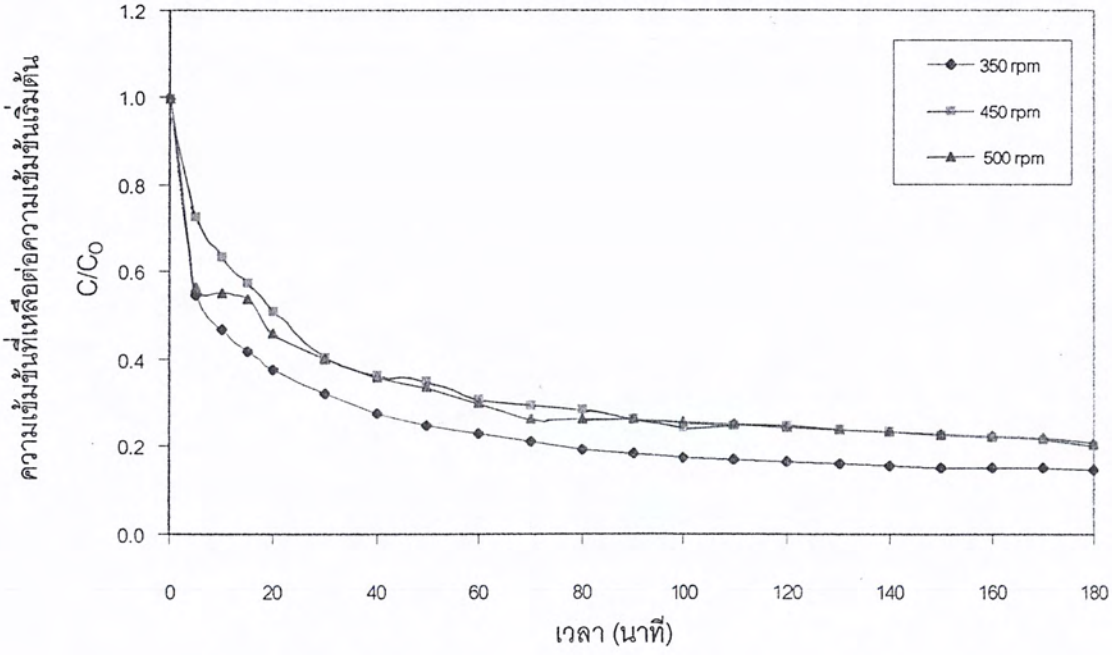
รูปที่ 4.9 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



(ก)

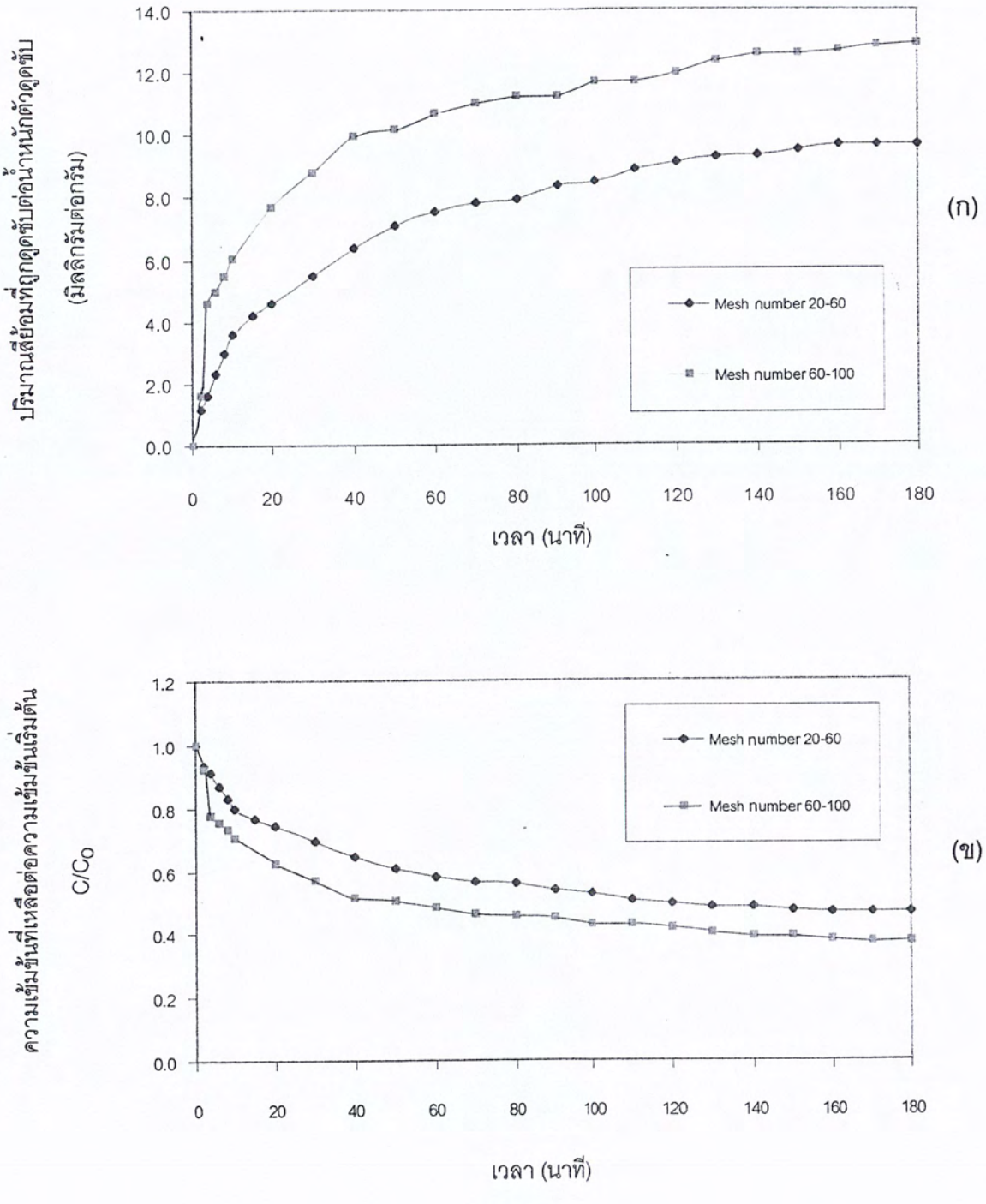


(ข)

รูปที่ 4.10 ผลของความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

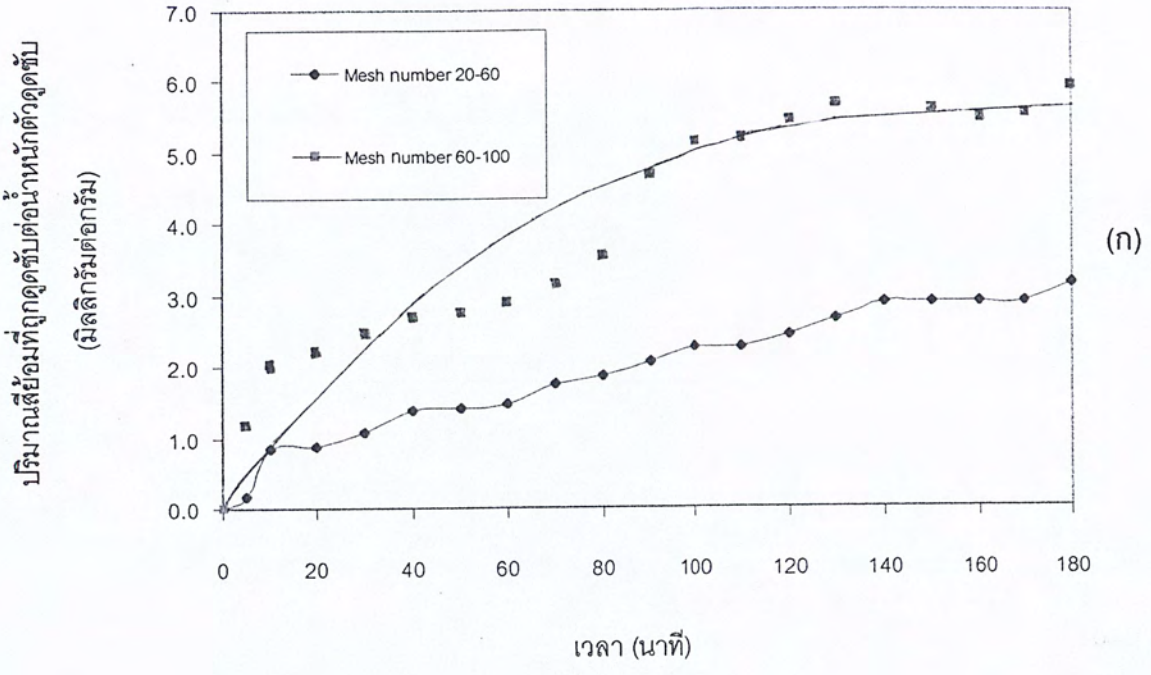
(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

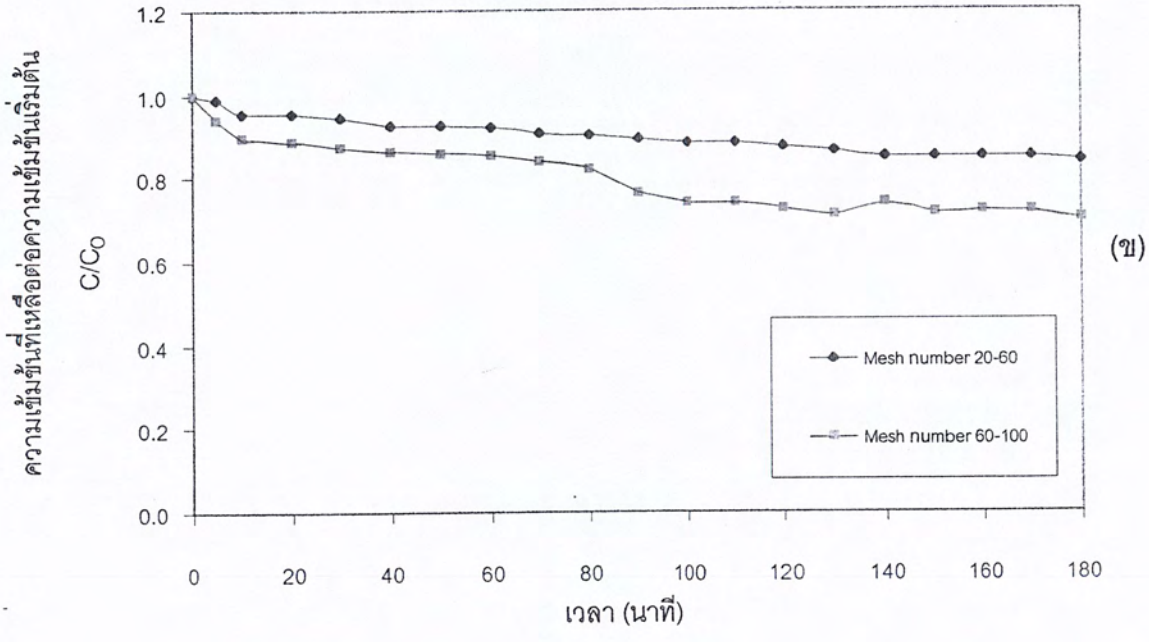


รูปที่ 4.11 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด

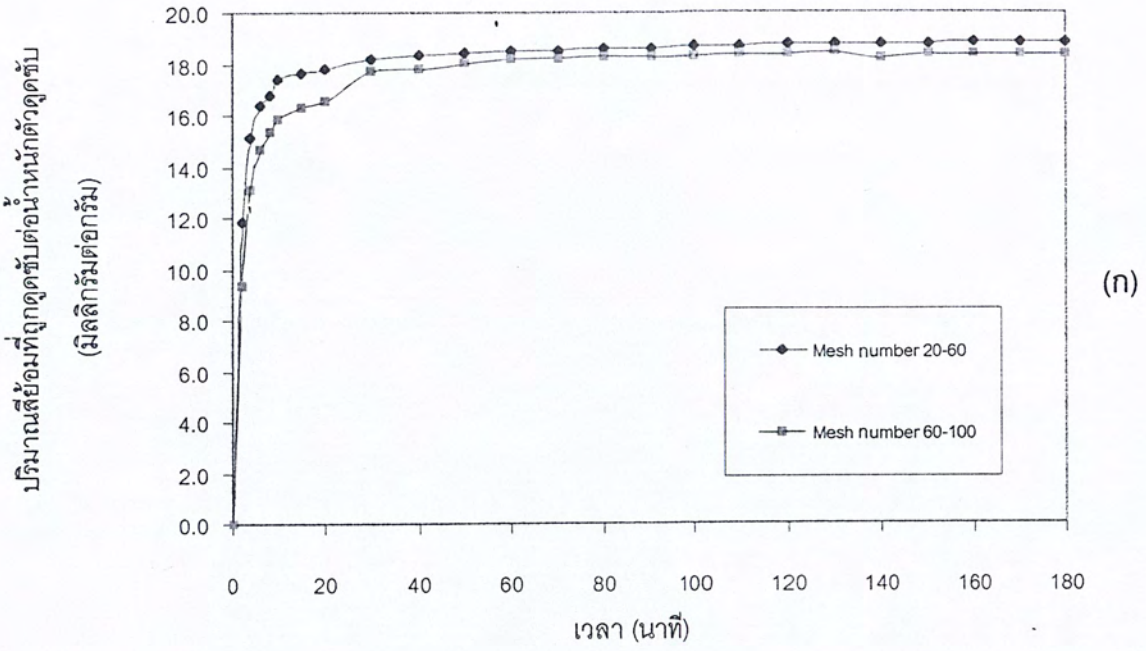
(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

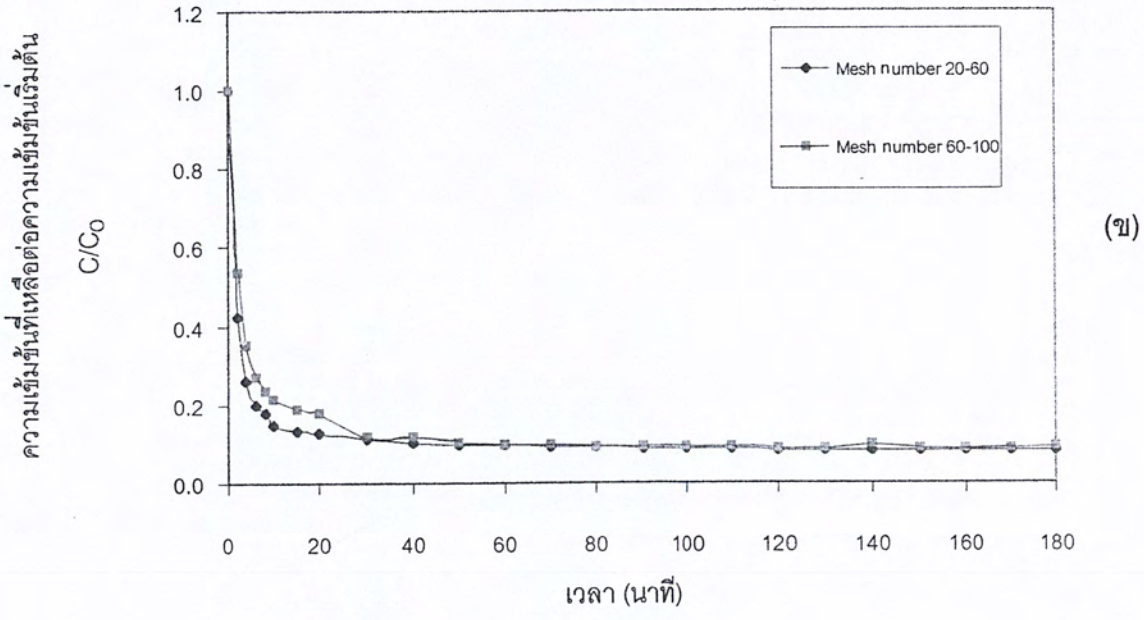




รูปที่ 4.12 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง
(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา
(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



(ก)

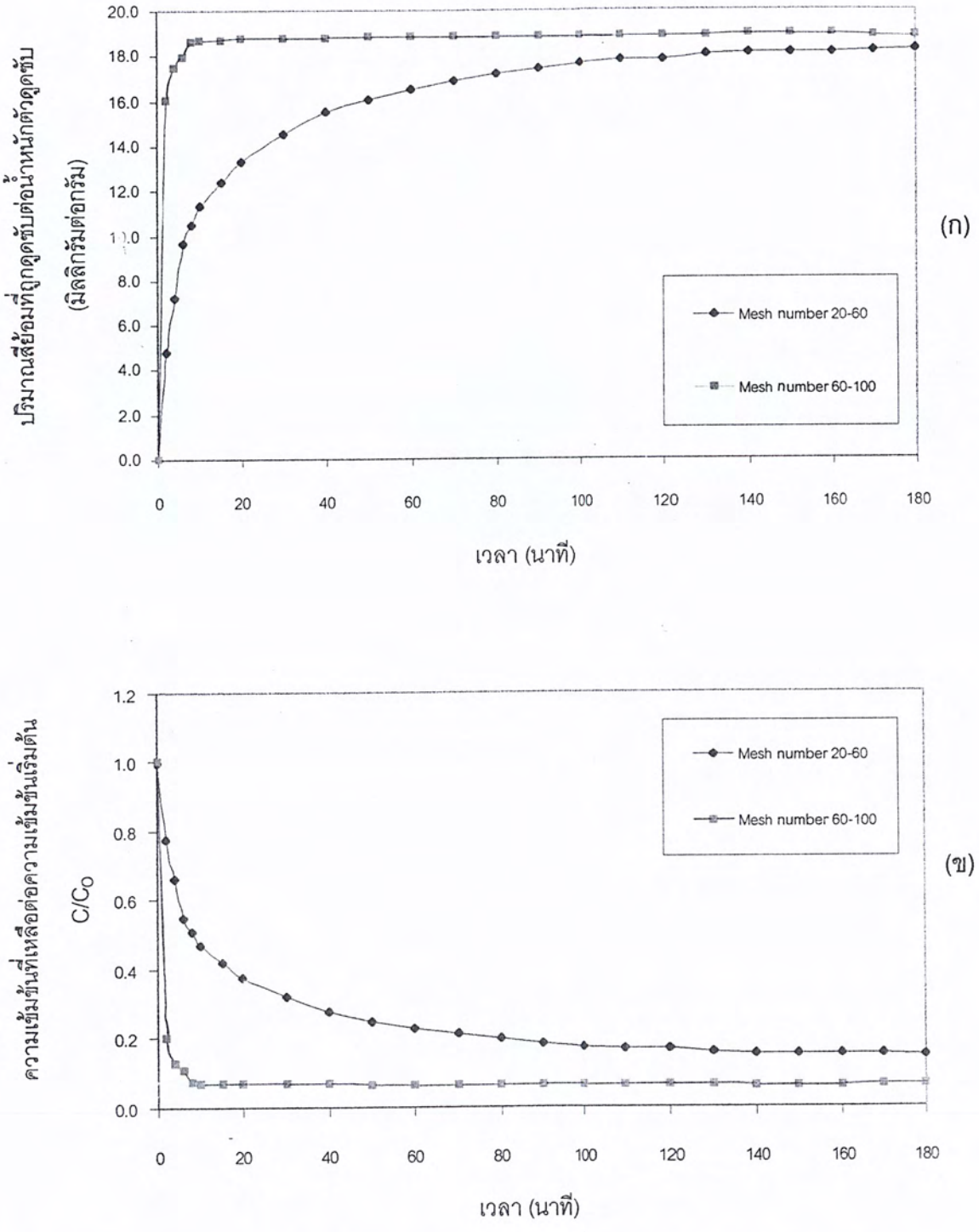


(ข)

รูปที่ 4.13 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



รูปที่ 4.14 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง (ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา (ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

4.2.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ

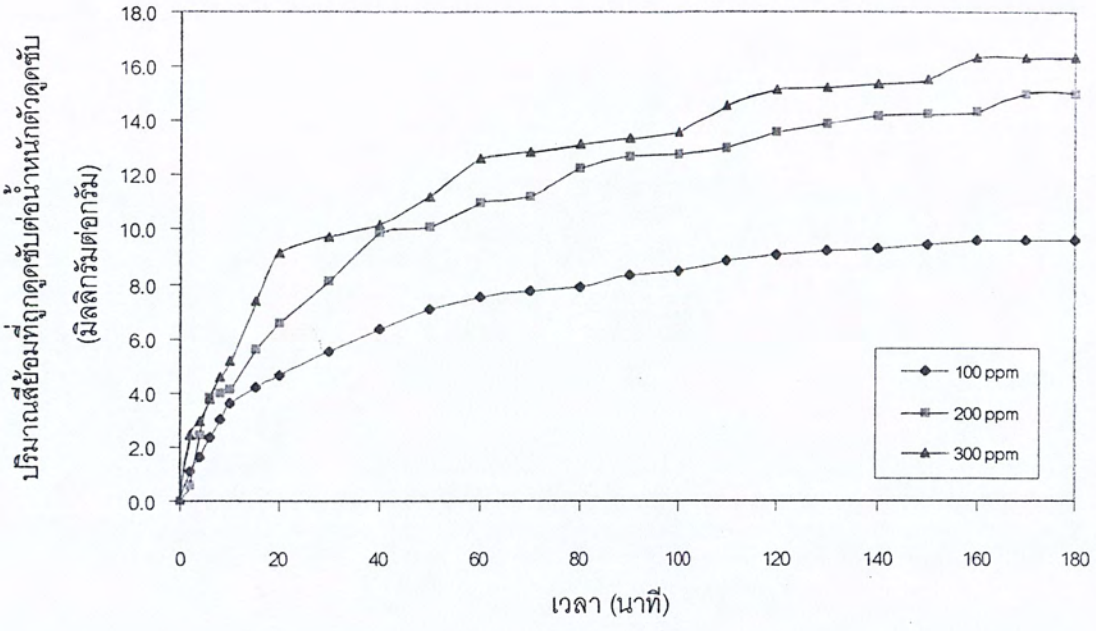
การทดลองจะใช้สารละลายสี Methylene Blue และสารละลายสี Congo Red ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100, 200 และ 300 ppm ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 °C ตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15-4.18 และภาคผนวก ช

จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมสูงขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย

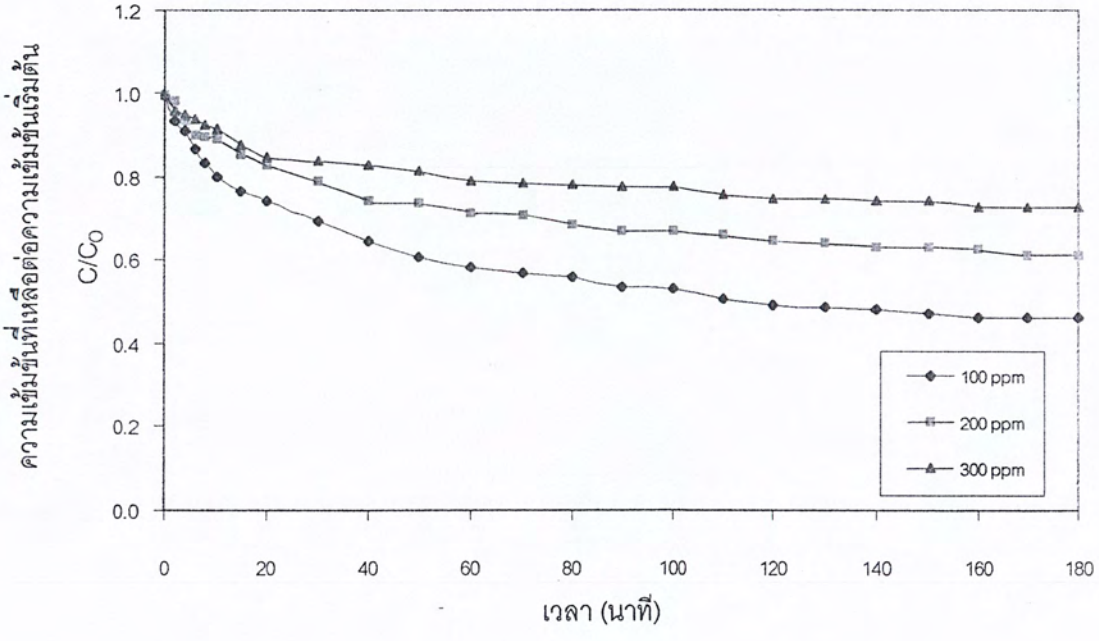
4.2.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

การทดลองจะใช้สารละลายสี Methylene Blue และสารละลายสี Congo Red ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 °C ตัวดูดซับขนาด Mesh number 20-60 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19-4.22 และภาคผนวก ช

พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมของต้นข้าวโพดจะลดลง ส่วนความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมของต้นมันสำปะหลังจะสูงขึ้น

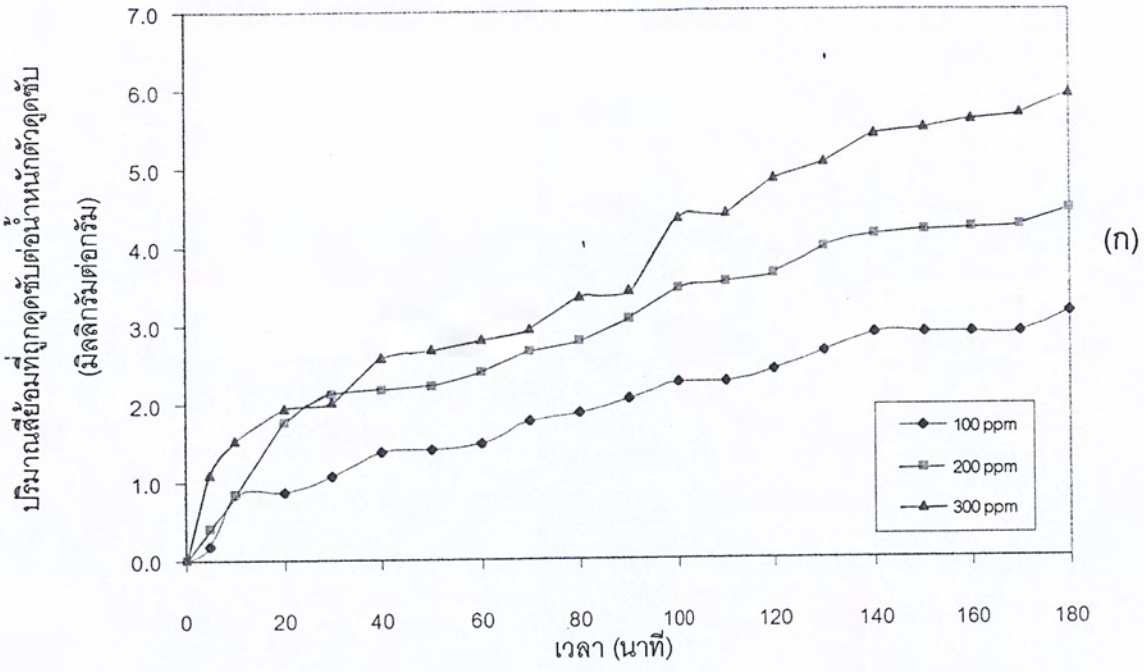


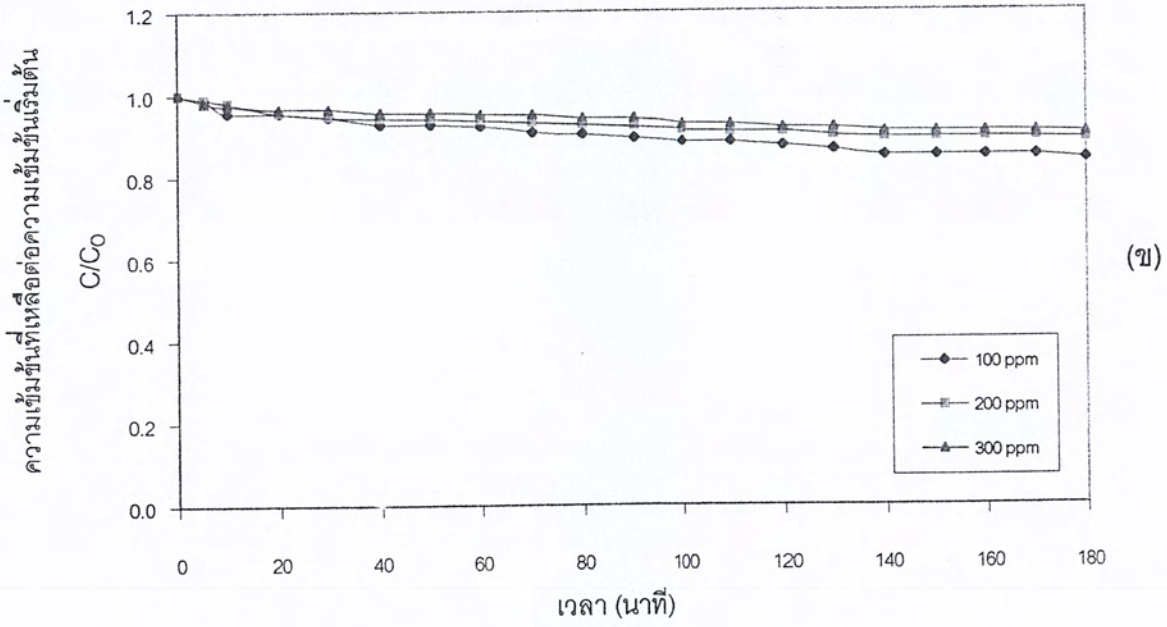
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด
(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา
(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

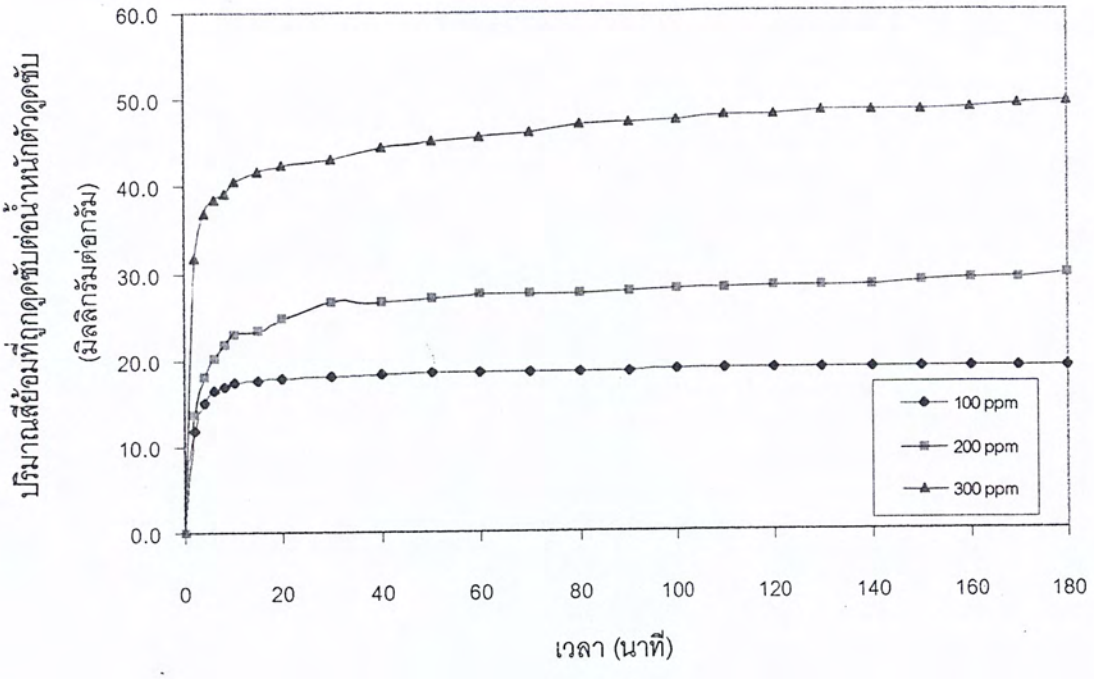




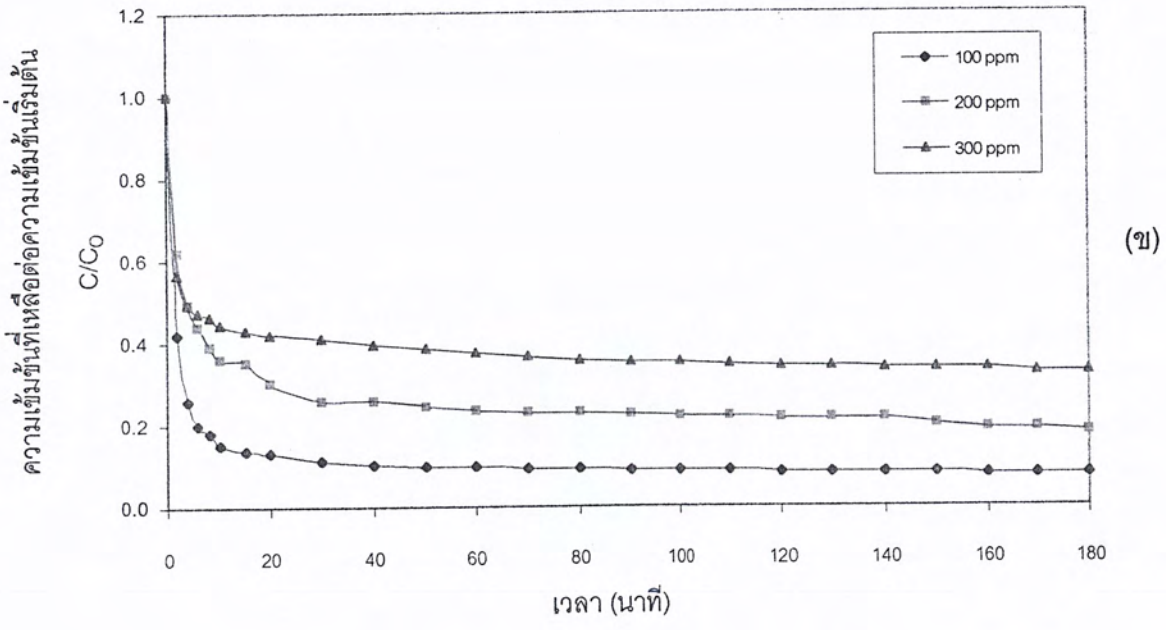
รูปที่ 4.16 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

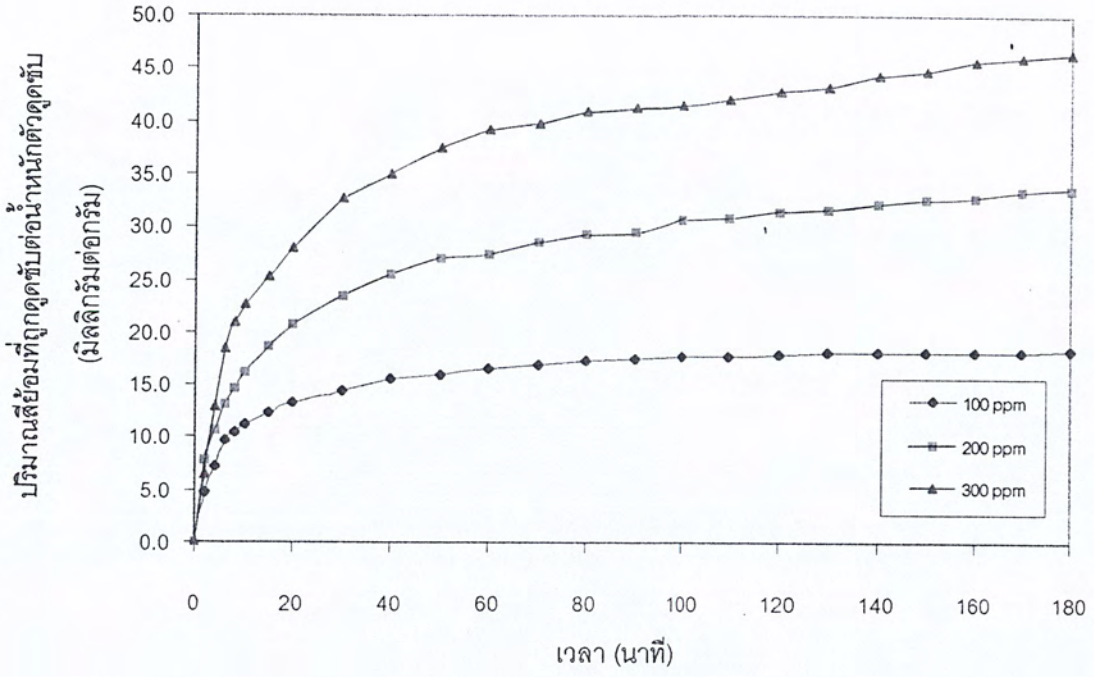


(ก)

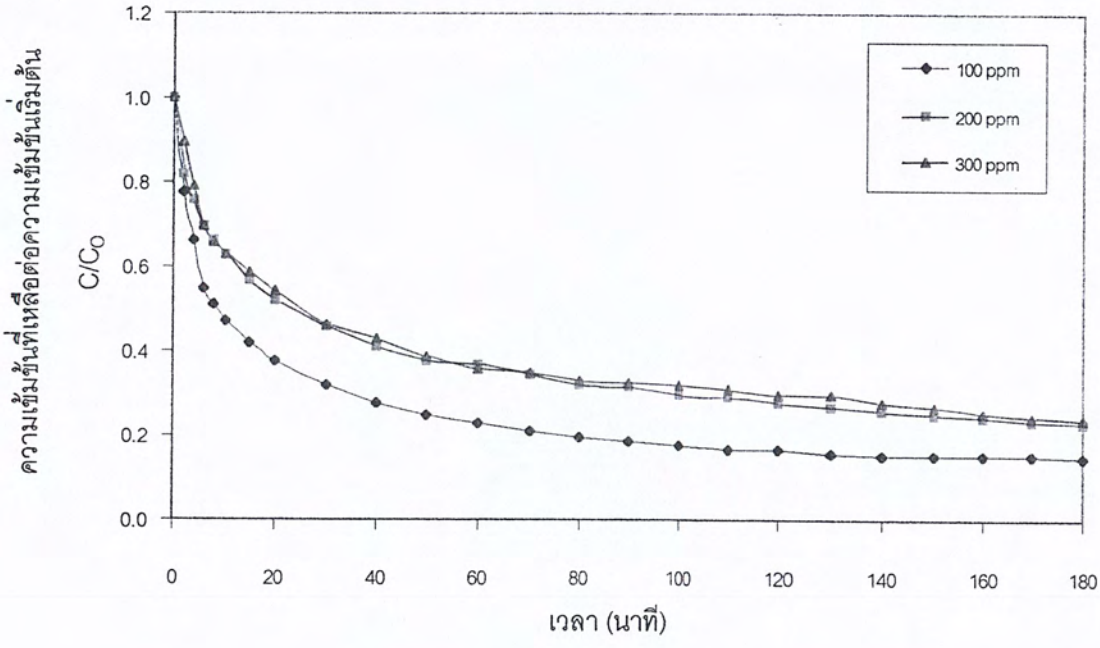


(ข)

รูปที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด (ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา (ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



(ก)

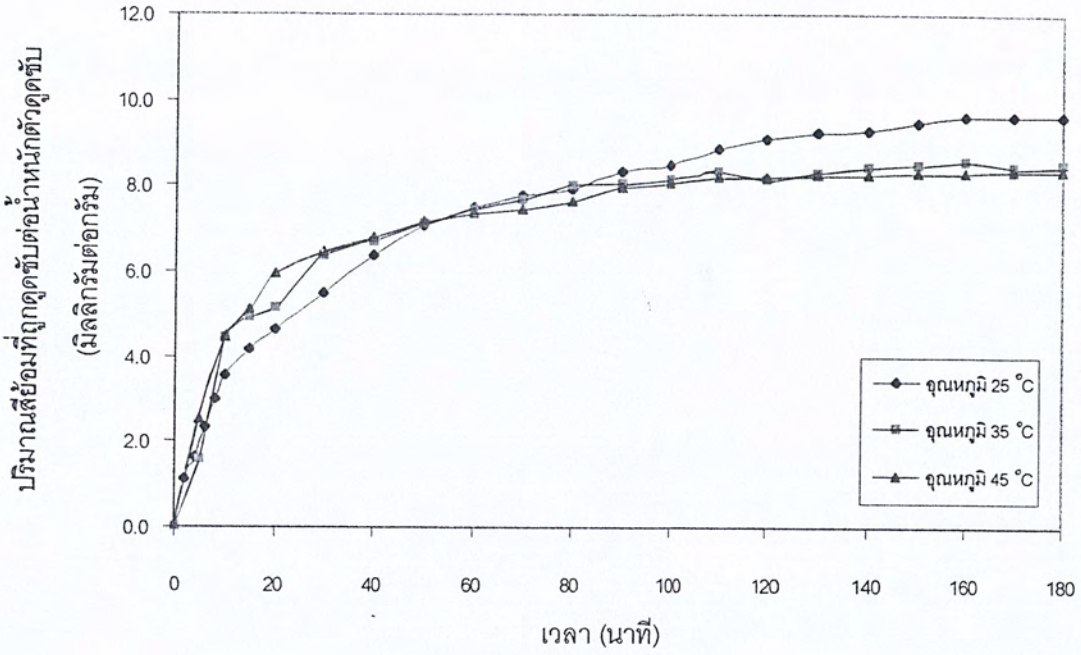


(ข)

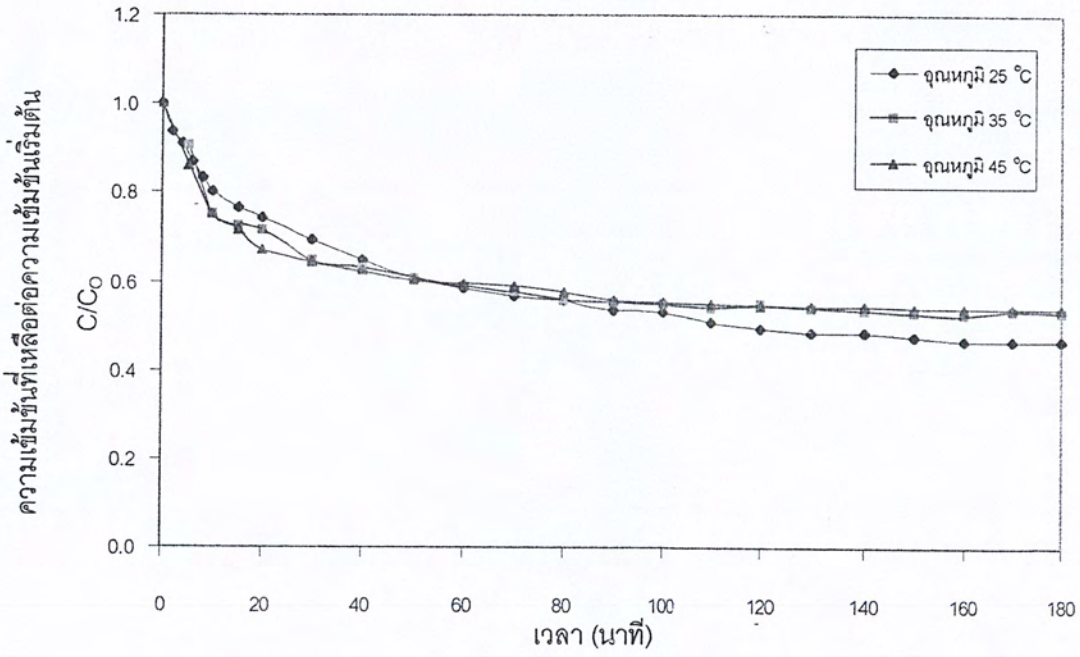
รูปที่ 4.18 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น กับเวลา



(ก)

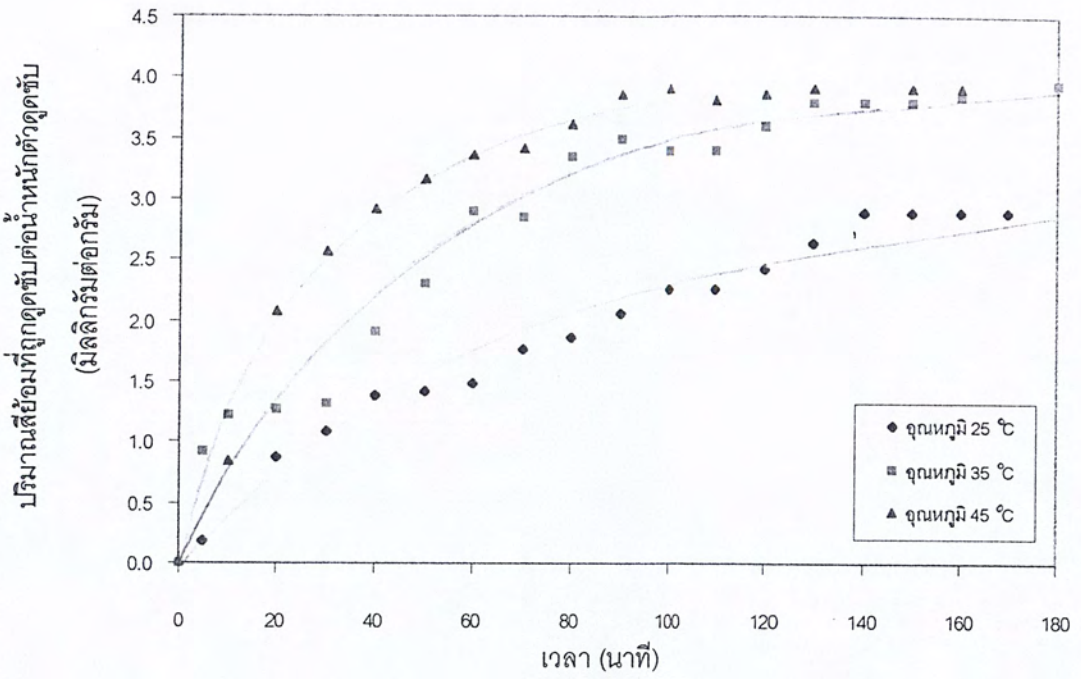


(ข)

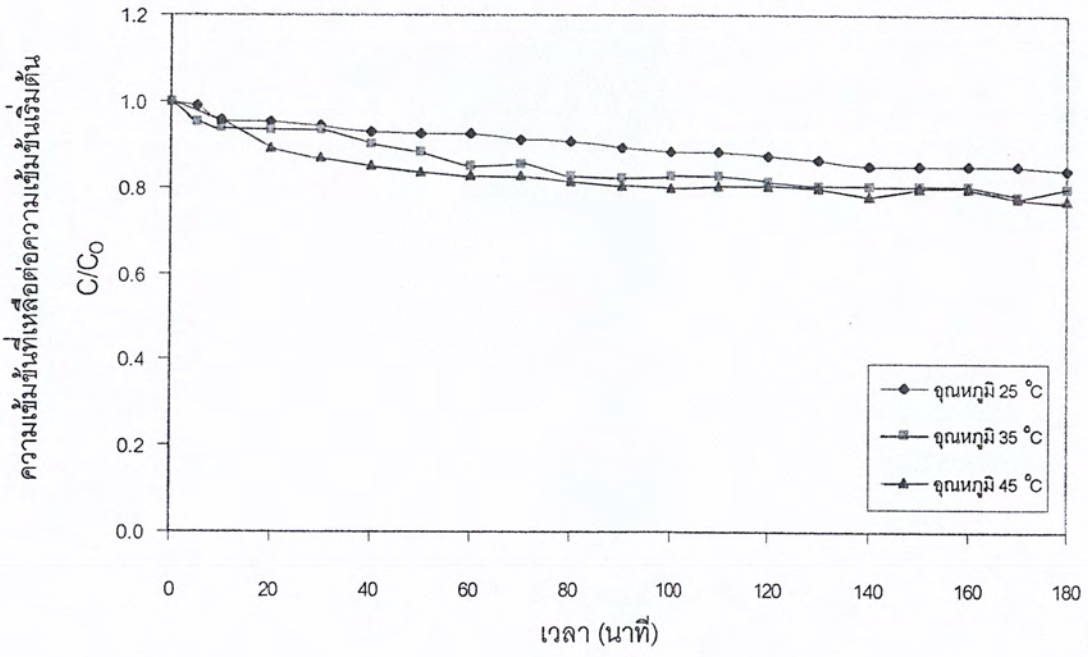
รูปที่ 4.19 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น กับเวลา



(ก)

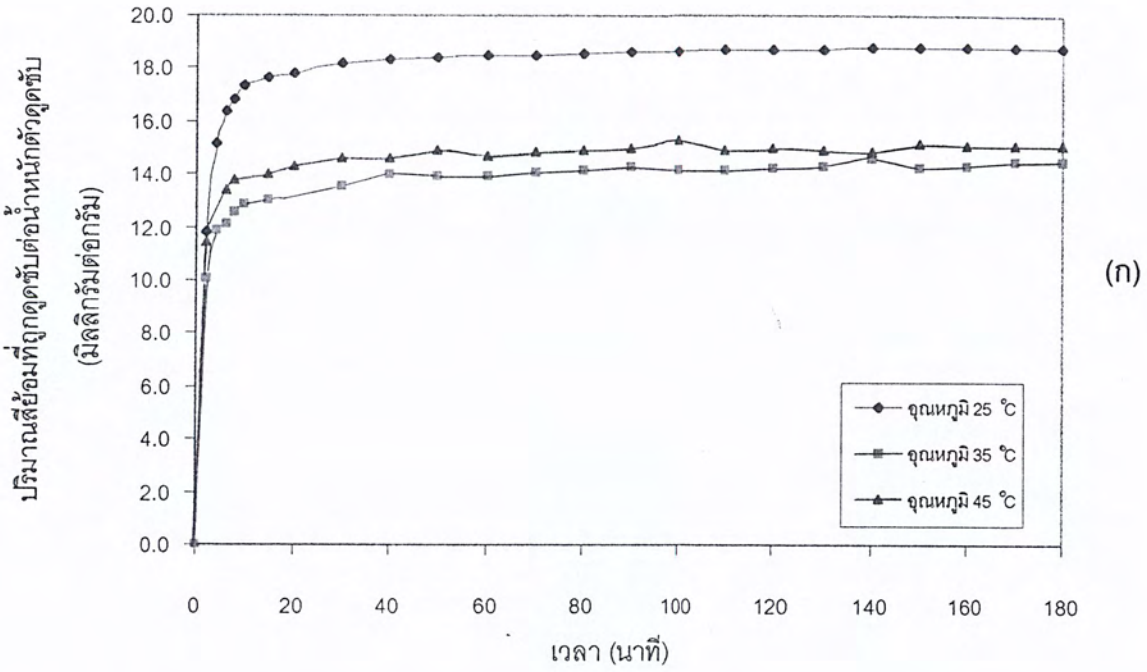


(ข)

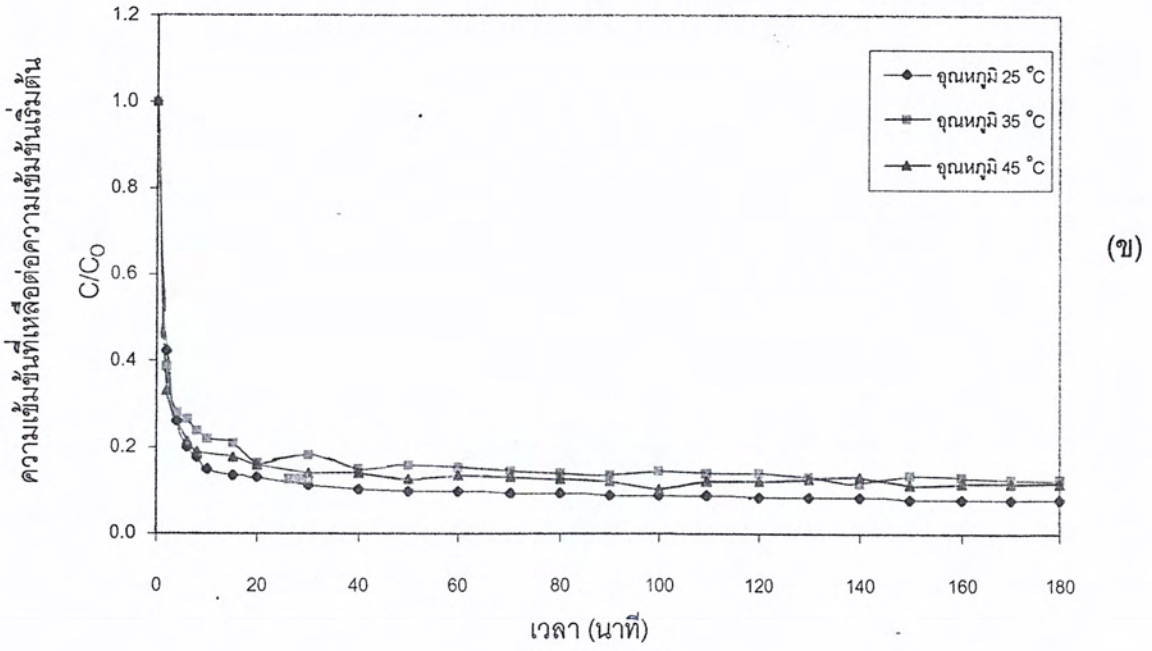
รูปที่ 4.20 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง

(ก) ปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา

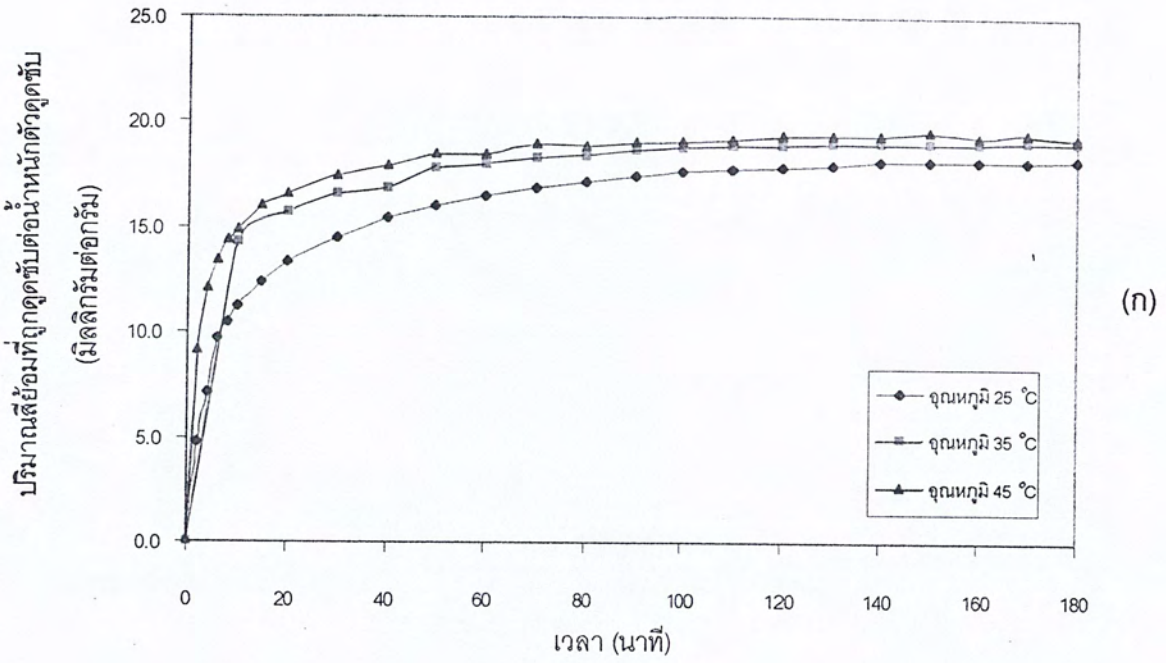


(ก)

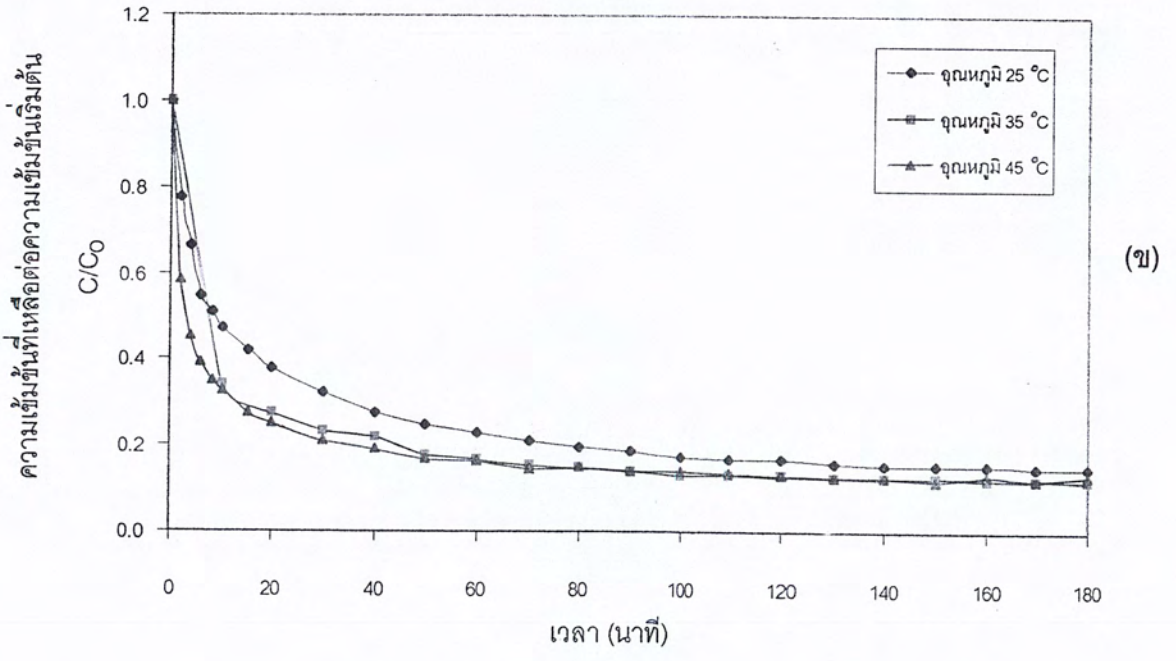


(ข)

รูปที่ 4.21 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด
(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา
(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้นกับเวลา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง

(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับกับเวลา

(ข) เปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหลือต่อความเข้มข้นเริ่มต้น กับเวลา

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับจะทำการหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้แบบจำลอง 3 แบบ คือ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง แบบจำลองการแพร่ในตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.23-4.26 และภาคผนวก ฌ ค่าคงที่ และค่า R^2 ที่ได้สำหรับแบบจำลองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.2-4.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า R^2 แล้วพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดคือแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

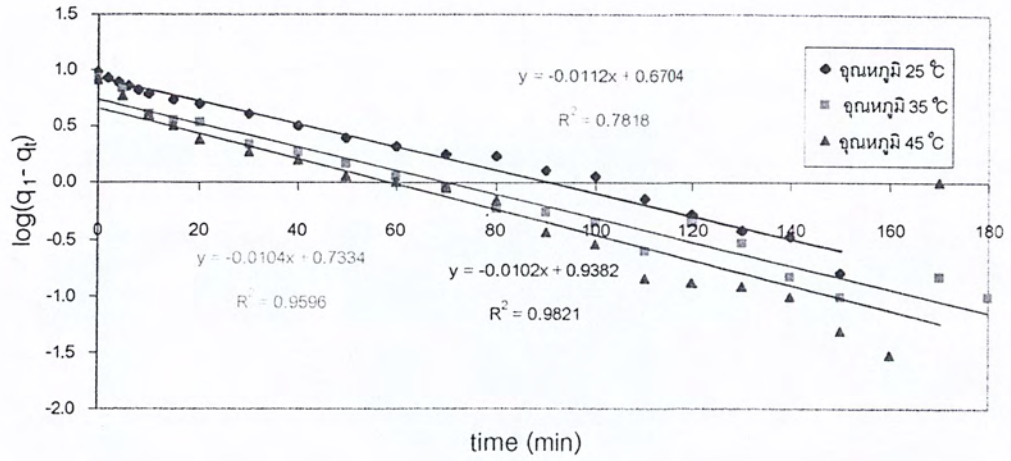
เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการดูดซับดังตารางที่ 4.2-4.5 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่อัตราการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและความสามารถในการดูดซับของต้นข้าวโพดจะลดลง ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของต้นมันสำปะหลังจะสูงขึ้น

ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ จะทำการ เขียน กราฟระหว่าง ln k กับ 1000/T ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.27 ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6

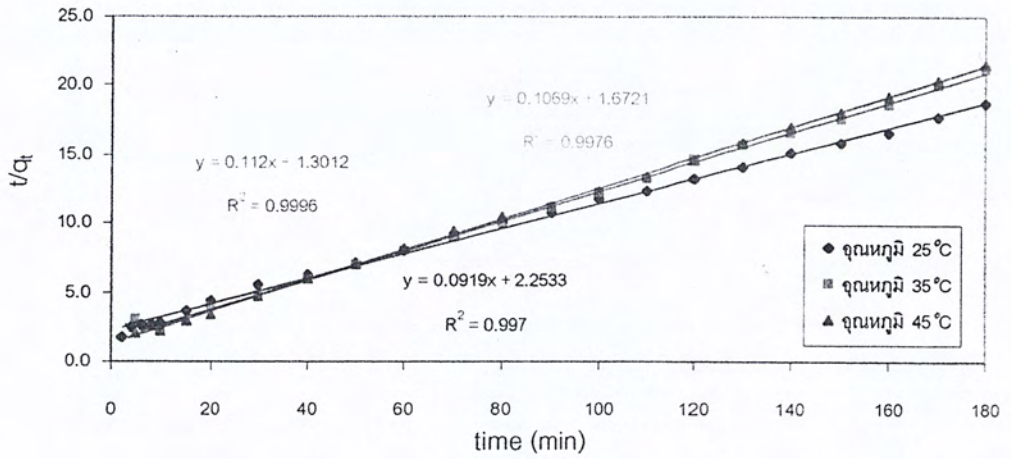
เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.18) พบว่าเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับมากขึ้นจะทำให้ค่าคงที่อัตราการดูดซับลดลง และทำให้อัตราการดูดซับลดลงด้วย

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue จะต่ำกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Congo Red นั่นหมายความว่า อัตราการดูดซับของสารละลายสี Methylene Blue จะมากกว่าอัตราการดูดซับของสารละลายสี Congo Red นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลาย Methylene Blue โดยใช้ต้นข้าวโพดเป็นตัวดูดซับจะต่ำที่สุด ในขณะที่ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Congo Red จะสูงที่สุด

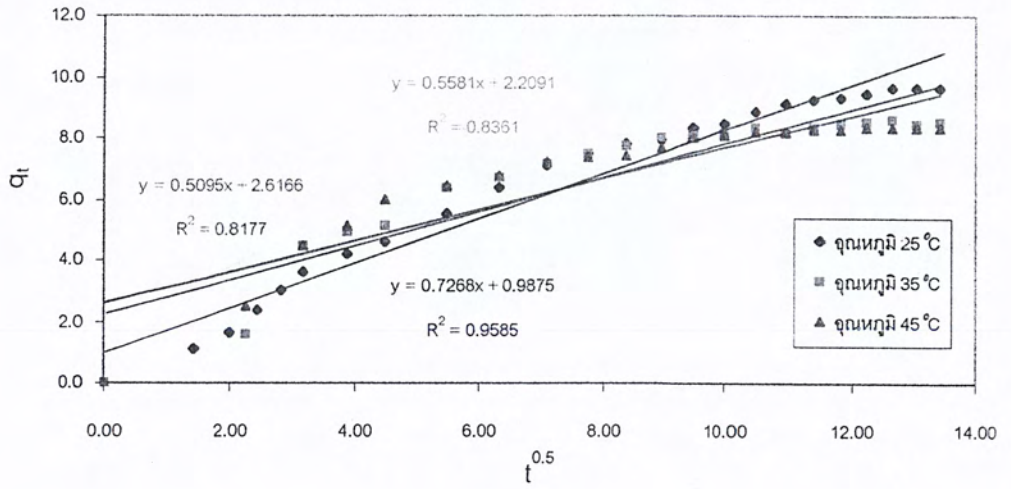
แม้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ต้นข้าวโพดเป็นตัวดูดซับจะสูงกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ต้นมันสำปะหลังเป็นตัวดูดซับ แต่กลับพบว่าความสามารถและอัตราเร็วของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยใช้ต้นข้าวโพดเป็นตัวดูดซับจะมีค่าสูงกว่าใช้ต้นมันสำปะหลังเป็นตัวดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถและอัตราเร็วในการดูดซับมิได้ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับเพียงอย่างเดียว ทว่ายังขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ความถี่ของการชนอีกด้วย



(ก)

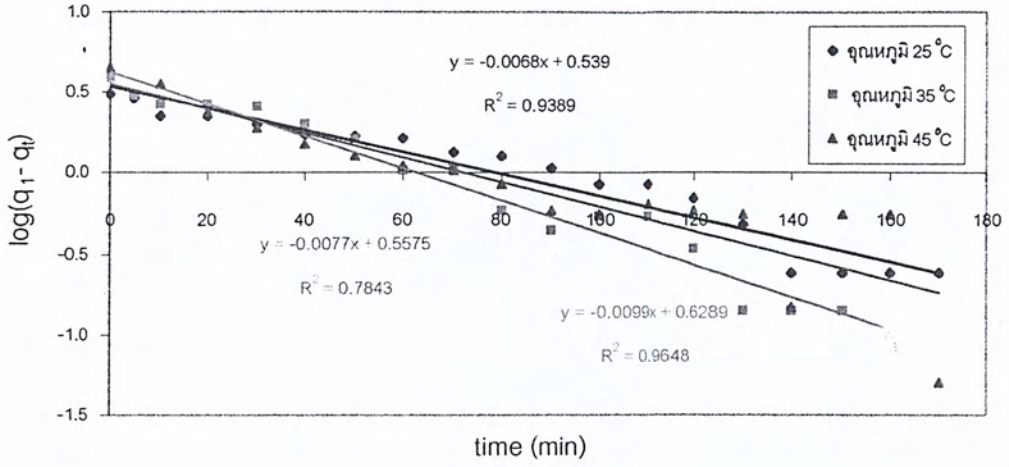


(ข)

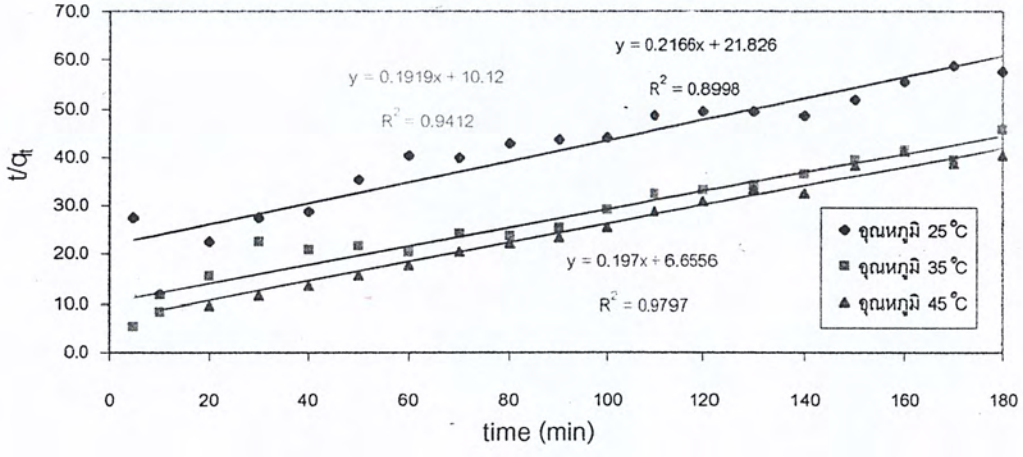


(ค)

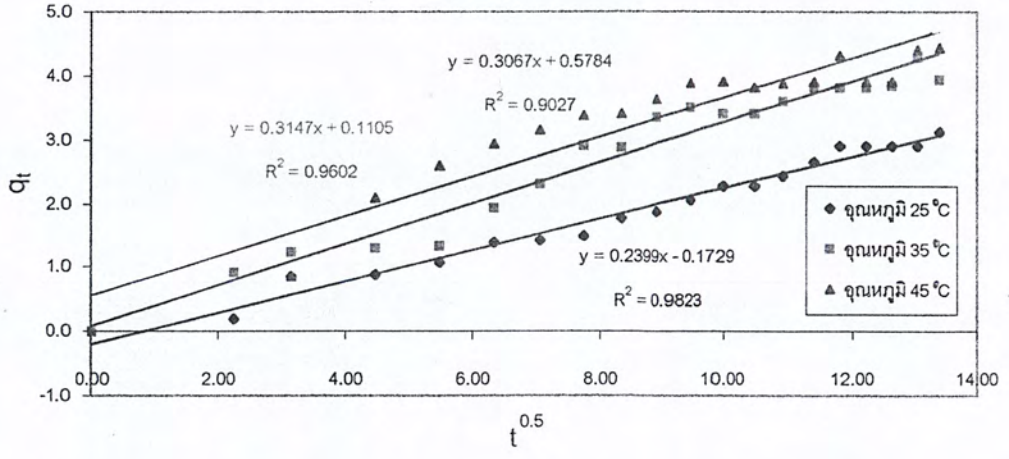
รูปที่ 4.23 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพดในแบบจำลองต่างๆ : (ก) อันดับหนึ่ง; (ข) อันดับสอง; (ค) การแพร่ภายในตัวดูดซับ



(ก)

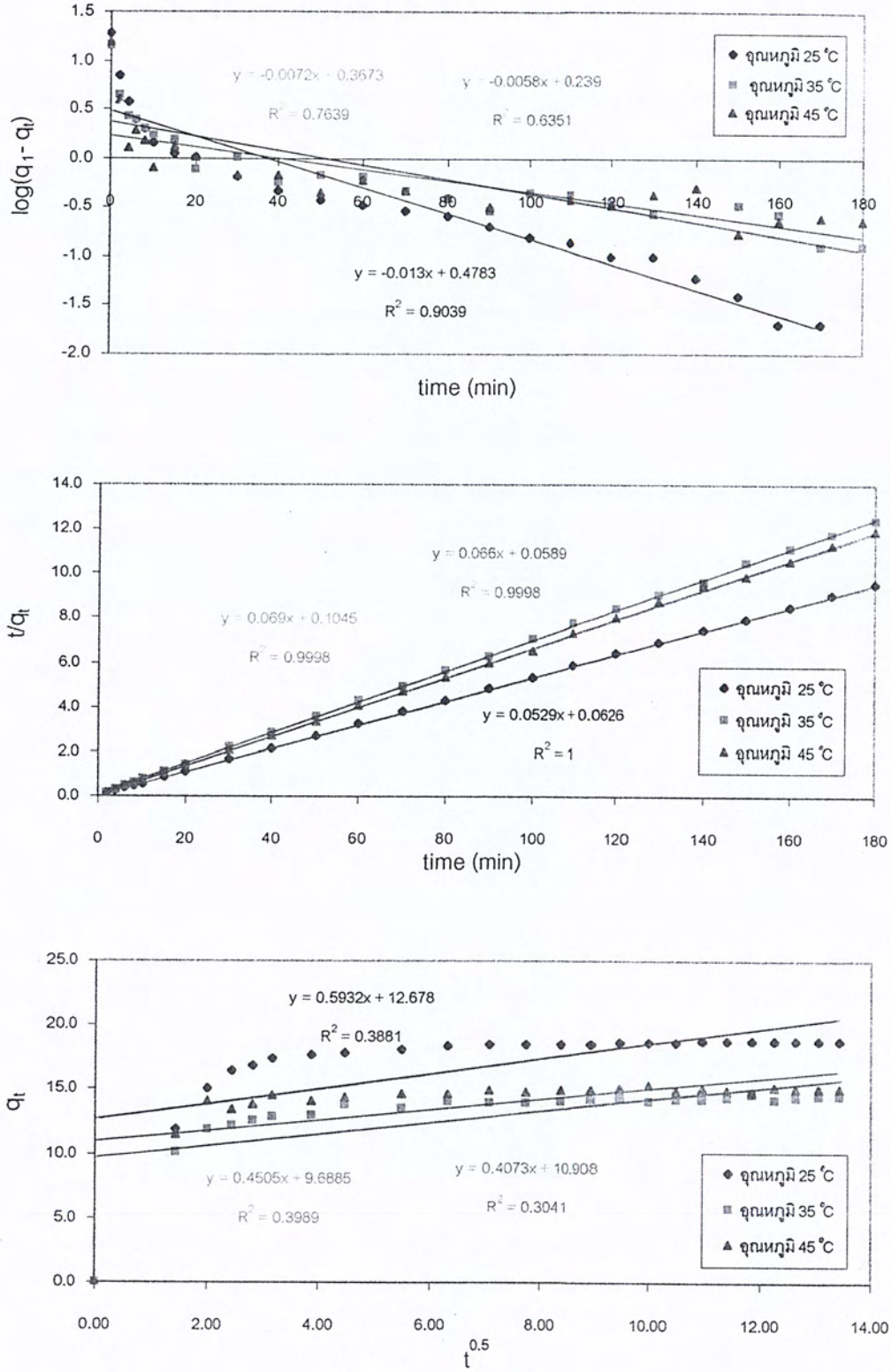


(ข)

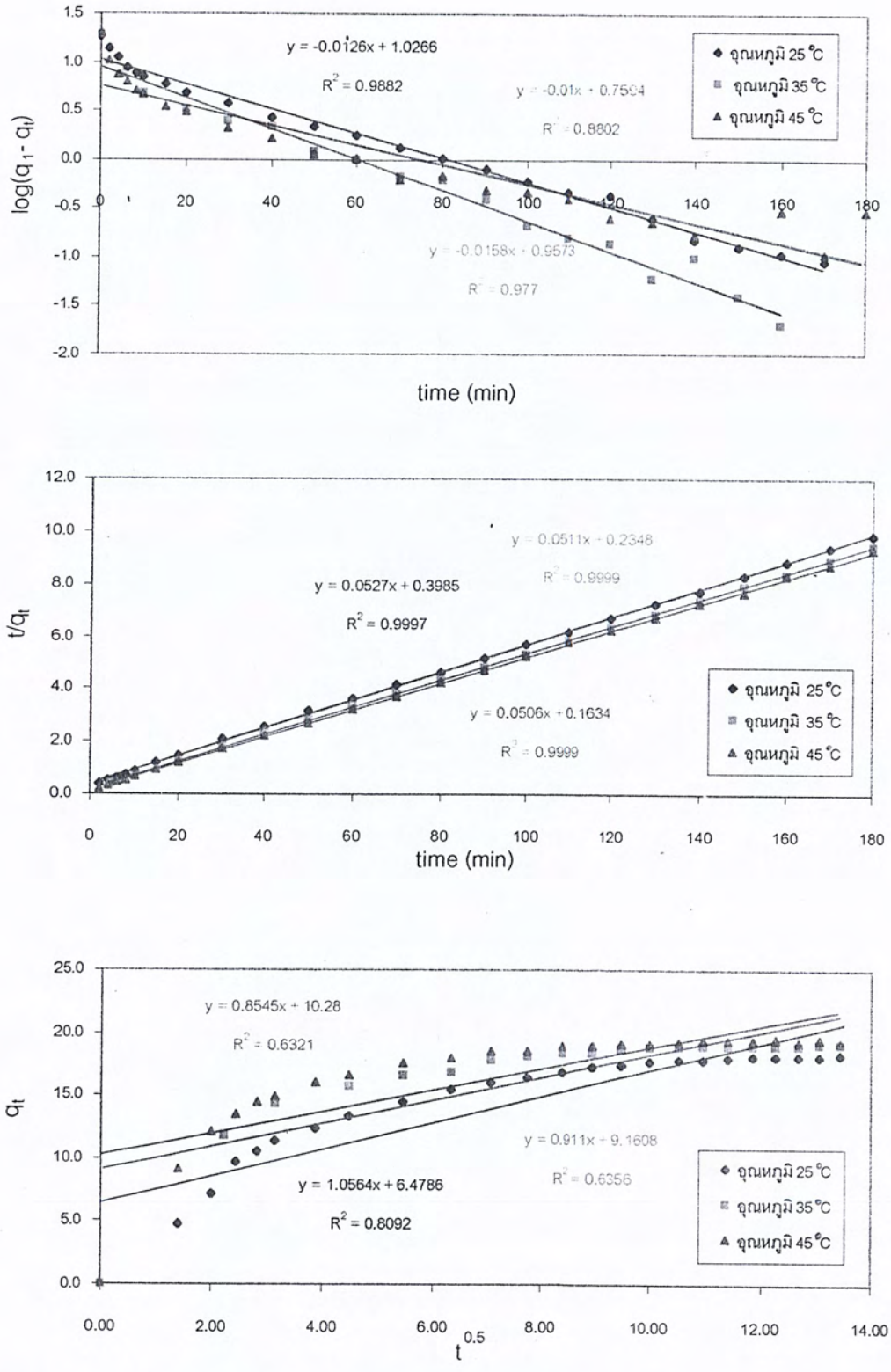


(ค)

รูปที่ 4.24 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลาย Congo Red โดยต้นมันสำปะหลังในแบบจำลองต่าง ๆ : (ก) อันดับหนึ่ง; (ข) อันดับสอง; (ค) การแพร่ภายในตัวดูดซับ



รูปที่ 4.25 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลาย Methylene Blue โดยต้นข้าวโพดในแบบจำลองต่างๆ: (ก) อันดับที่หนึ่ง; (ข) อันดับที่สอง; (ค) การแพร่ภายในตัวดูดซับ



รูปที่ 4.26 การหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลาย Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลังในแบบจำลองต่างๆ: (ก) อันดับที่หนึ่ง; (ข) อันดับที่สอง; (ค) การแพร่ภายในตัวดูดซับ

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด

อุณหภูมิ	แบบจำลองอันดับ 1			แบบจำลองอันดับ 2			การแพร่ในตัวดูดซับ	
	q_1	k_1	R_1^2	q_2	k_2	R_2^2	k_i	R_i^2
25 °C	8.67	0.02349	0.9821	10.88	$3.732*10^{-3}$	0.997	0.7268	0.9585
35 °C	5.41	0.02395	0.9596	9.35	$6.834*10^{-3}$	0.9976	0.5581	0.8361
45 °C	6.34	0.258	0.7818	8.93	$9.640*10^{-3}$	0.9996	0.5095	0.8177

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง

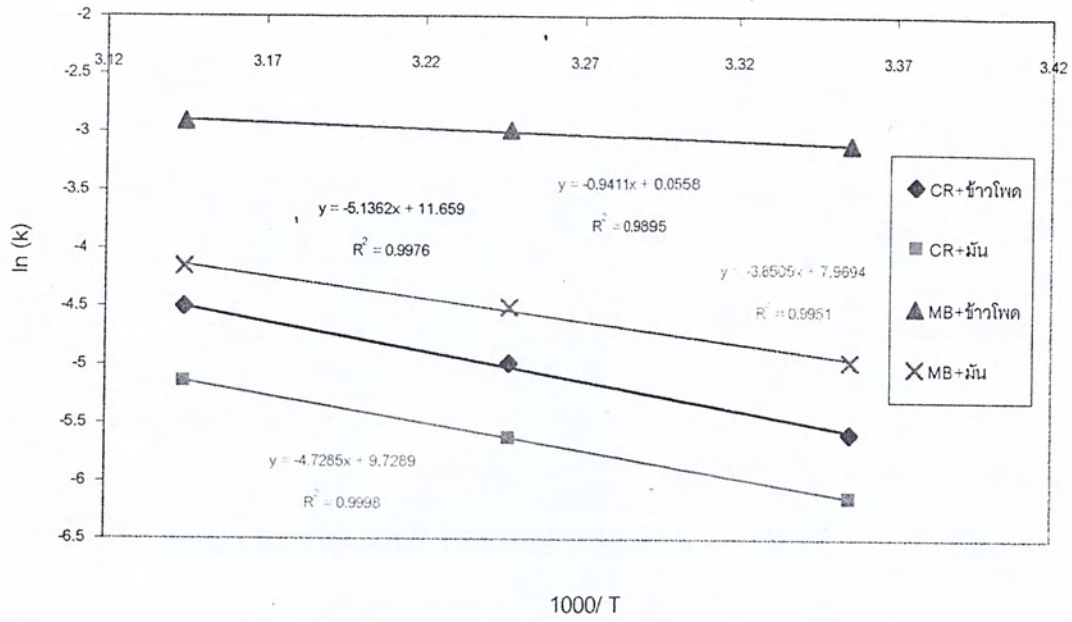
อุณหภูมิ	แบบจำลองอันดับ 1			แบบจำลองอันดับ 2			การแพร่ในตัวดูดซับ	
	q_1	k_1	R_1^2	q_2	k_2	R_2^2	k_i	R_i^2
25 °C	3.46	0.01566	0.9389	4.62	$2.150*10^{-3}$	0.8998	0.2399	0.9823
35 °C	4.26	0.0228	0.9648	5.21	$3.639*10^{-3}$	0.9412	0.3147	0.9602
45 °C	4.68	0.01773	0.7843	5.08	$5.831*10^{-3}$	0.9797	0.3067	0.9027

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด

อุณหภูมิ	แบบจำลองอันดับ 1			แบบจำลองอันดับ 2			การแพร่ในตัวดูดซับ	
	q_1	k_1	R_1^2	q_2	k_2	R_2^2	k_i	R_i^2
25 °C	3.01	0.02994	0.9039	18.90	$4.47*10^{-2}$	1.0000	0.5932	0.3881
35 °C	2.33	0.0166	0.7639	14.49	$4.556*10^{-2}$	0.9998	0.4505	0.3989
45 °C	1.734	0.01336	0.6351	15.15	$7.396*10^{-2}$	0.9998	0.4073	0.3041

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง

อุณหภูมิ	แบบจำลองอันดับ 1			แบบจำลองอันดับ 2			การแพร่ในตัวดูดซับ	
	q_1	k_1	R_1^2	q_2	k_2	R_2^2	k_i	R_i^2
25 °C	10.63	0.0290	0.9882	18.98	$6.960*10^{-3}$	0.9997	1.0564	0.8092
35 °C	9.06	0.0364	0.9770	19.57	$1.112*10^{-2}$	0.9999	0.9110	0.6356
45 °C	5.75	0.0230	0.8802	19.76	$1.567*10^{-2}$	0.9999	0.8545	0.6321



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln(k) กับ 1/ T ความชันของเส้นมีค่าเท่ากับ $-E_a/R$

ตารางที่ 4.6 ค่า E_a ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red และ Methylene Blue โดยต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 ppm

ชนิดของสี	ชนิดของตัวดูดซับ	E_a (kJ/mol)
Congo Red	ต้นข้าวโพด	42.704
	ต้นมันสำปะหลัง	39.314
Methylene Blue	ต้นข้าวโพด	7.825
	ต้นมันสำปะหลัง	32.014

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การดูดซับสารละลายสี Methylene Blue และ Congo Red โดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังเป็นตัวดูดซับจะเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir isotherm ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังสามารถดูดซับสารละลายสี Methylene Blue ได้ดีกว่าสารละลายสี Congo Red คาดว่าเนื่องจากเซลลูโลสเมื่อแตกตัวในน้ำจะให้โครงสร้างที่เป็นประจุลบจึงสามารถดูดซับสารละลายสี Methylene Blue ที่โครงสร้างแตกตัวเป็นประจุบวกได้ดี [25]

การศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าเมื่อทำการปั่นกวนสารละลายสีย้อมที่ความเร็วรอบ 350, 450 และ 500 รอบต่อนาที ความเร็วรอบในการปั่นกวนในช่วงที่ทำการศึกษาแทบจะไม่มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมของต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง เนื่องจากความเร็วรอบในช่วงนี้จะช่วยลดผลของขั้นการแพร่ของสารละลายสีย้อมไปยังฟิล์มที่ผิวของตัวดูดซับให้เหลือน้อยที่สุด

การศึกษาผลของขนาดของตัวดูดซับ พบว่าขนาดของต้นข้าวโพดไม่ค่อยมีผลต่ออัตราการดูดซับ ส่วนต้นมันสำปะหลังเมื่อมีขนาดเล็กลงอัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างภายในของต้นข้าวโพดมีความเป็นรูพรุนสูงพื้นที่ผิวภายนอกจึงไม่มีผลต่อการดูดซับ ส่วนต้นมันสำปะหลังที่นำมาใช้จะใช้ทั้งส่วนที่เป็นเปลือกและลำต้นจึงมีความเป็นรูพรุนต่ำ ดังนั้นเมื่อทำให้มีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวจะสูงขึ้นอัตราการดูดซับจึงสูงขึ้น

เมื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม จะพบว่าความเร็วในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น และความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงจะดีกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ

เมื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น และความสามารถในการดูดซับของต้นมันสำปะหลังจะสูงขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของต้นข้าวโพดจะลดลง

เมื่อทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่าการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue และ Congo Red โดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลังเป็นตัวดูดซับจะเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง และค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสองจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อทำการศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue จะต่ำกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสารละลายสี Congo Red

5.2 ข้อจำกัดในการทดลองและข้อเสนอแนะในการทดลองต่อไป

1.1 เครื่องปั่นกวนมีขีดจำกัดในด้านความเร็วรอบ ความเร็วรอบที่สามารถปั่นกวนได้สูงสุดคือ 500 รอบต่อนาที ดังนั้นจึงไม่สามารถศึกษาผลของความเร็วรอบได้อย่างชัดเจน

1.2 หากทำการทดลองต่อควรหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวดูดซับ เช่น พื้นที่ผิว การกระจายของรูพรุน และขนาดของรูพรุน เป็นต้น เพื่อเป็นส่วนสนับสนุนการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

1.3 อาจมีการนำตัวดูดซับเหล่านี้ไปแพคคอลัมน์เพื่อทำการดูดซับและศึกษาหาสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

1. Charles, N., Satterfield, 1991, **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice.** 2nd ed., New York : McGraw-Hill Book Company, pp. 31-50 .
2. Noll, K.E., Gounarios, V. and Hou, W., 1992, **Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control.** Michigan, Lewis, pp. 199-216.
3. Oscik, J., **Adsorption.** New York, John Wiley & Soms, pp. 157-193.
4. ยุวลี เดชวิทย์ และสายใจ นารถสมบรูณ์. **ผลของโซเดียมคลอไรด์ และซิงค์คลอไรด์ ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
5. วิภาวดี นวลทวี และศรีประภา กล้วยไม้ ณ อยุธยา. **การบำบัดสีไดเรคท์ด้วยผักตบชวา.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2540.
6. อัจฉราพร ไศละสูต. **คู่มือการย้อมสี.** พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพ : กรุงเทพฯเทคนิค 19 การพิมพ์. หน้า 149-153.
7. อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์. **การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยขี้เถ้าลอยลิกไนต์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2538.
8. วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ. **การใช้ถังกรองดูดซับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2539.
9. Ho,Y.S. and McKay, G., 1998, **Sorption of Dyes from Aqueous Solution by Peat.** Chemical Engineering Journal, Vol.70, pp. 115-124.
10. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **เคมีทั่วไป เล่ม 1.** สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2535. หน้า 308-341.
11. ทบวงมหาวิทยาลัย. **เคมี เล่ม 1.** บริษัทอักษรเจริญทัศน์ อจท. จำกัด. 2540. หน้า 336-353.

12. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ และคณะ. **การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำด้วยถ่านคาร์บอนกัมมันต์ประเภทต่าง ๆ**. การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. หน้า 1-12.

13. สมชาย เอกธรรมสุทธิ์. **การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าโดยวิธีทางเคมี.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2514.

14. วิไลพร วณิชย์วโรดม. **การบำบัดของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอโดยกระบวนการดูดซับด้วย** Activated Carbon. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2536.

15. Pachal, B.D. and Roy, A.H., 1976, **Treatment of Dye Waste with Granular Activated Carbon.** Textile Chemist and Colorist, Vol.8, No.4, pp. 34-38.

16. Ghash, M.M., Wcodard, F.E., Sproul, O.J.,Knowlton, P.B. and Gvertin, P.D., 1978, **Treatability Studies and Design Consideration for Textile Wastewater.** Water and Waste Engineering, Vol.4, No.15, pp. 35-51.

17. Chia-Chang Lin and Hwai-Shen Liu, 2000, **Adsorption in Centrifugal Field: Basic Dye Adsorption by Activated Carbon.** Ind. Eng. Chem., Vol. 39, No. 1, pp. 161-167.

18. Ernst, W.R., 1979, **Adsorption of Textile Dyes from Aqueous Solution by Activated Carbon from Peanut Hulls.** GRAI 7924, January, p.87

19. Mitchell, M., Ernst, W.R., Rasmussen, E.T., Bangerzadeh, P. and Lightsey, G.R., 1978, **Adsorption of Textile Dyes by Activated Carbon Produced from Agricultural, Municipal and Industrial Waste.** Bullentin of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 19, No. 3, pp. 307-311.

20. Villiers, R.V., 1972, **Lime Classification and Activated Carbon Adsorption should be Useful for Primary Treatment and Raw Municipal Wastewater.** Water and Waste Engineering, Vol. 1, No. 9, pp. 32-35.

21. Weber, W.J., Jr., 1972, **Physicochemical System for Direct Wastewater Treatment, Vanderbilt University.** Nashville, Tannessee, Environment Press, pp. 13-25.

22. McKay, G., Geundi,M.E., and Nassar, 1986, **Equilibrium Studies During the Removal of Dyestuff from Aqueous Solutions Using Bagasse Pith.** Water Research, Vol. 12, pp. 1513-1520.

23. McKay, G., Geundi,M.E., and Nassar, 1988, **External Mass Transport Processes During the Adsorption of Dyes onto Bagasse Pith.** Water Research, Vol. 12, pp. 1527-1533.

24. Geundi, M.E., 1991, **Colour Removal from Textile Effluents by Adsorption Techniques.** Water Research, Vol. 25, No. 3, pp. 271-273.

25. Gang Sun and Xiangjing Xu, 1997, **Sunflower Stalks as Adsorption for Color Removal from Textile Wastewater.** Ind. Eng. Chem., Vol. 3, pp. 808-812.

26. Nassar, M.M. and Magdy, Y.H., 1997, **Removal of Different Basic Dyes from Aqueous Solutions by Adsorption on Palm-fruit Bunch Particles.** Chemical Engineering Journal, Vol. 66, pp. 223-226.

27. Poots, V.J.P., McKay and Heavy, J.J., 1976, **The Removal of Acid Dyes from Effluent Using Natural Adsorbents-II Wood.** Water Research, Vol.10, pp. 1067-1070.

28. Asfour, H.M., Nassar, M.M., Fadali, O.A. and El-Geundi, M.S., 1985, **Colour Removal from Textile Effluents Using Hardwood Sewdust as an Absorbent.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 35A, pp. 28-35.

29. Heng, L.A., 1992, **Textile Wastewater Treatment Using Sewdust Adsorption Technique.** Environmental Protection and Control Technology, Vol. 11, pp. 573-580.

30. พัชรี คำธิตา และคณะ. **การกำจัดสีอินทรีย์ที่ละลายในน้ำด้วยดินฟอกสีที่ใช้แล้ว.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและกระบวนการ มหาวิทยาลัยรังสิต. 2537.

31. McKay, G., Otterburn, M.S., and Aga, J.A., **Fuller's Earth and Fired Clay as Absorpbents for Dyestuffs External Mass Transport Processes During Adsorption.** Water Air and Soil Pollution, Vol. 26, pp. 149-161.

32. กานดา ใจดี. **ไคโตแซนบำบัดสีย้อม.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.

33. McKay, G., Blair, H.S. and Gardner, **Adsorption of Dyes on Chitin. I. Equilibrium Studies.** Journal of Applied Polymer Science, Vol. 27, pp. 3043-3057.

ภาคผนวก ก

สีย้อม

สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสภาวะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใย คือ

ก. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

ข. แรงวัลเดอวัลล์ (Van der Waal's forces)

ค. แรงอิออนิก (Ionic forces)

ง. พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใย จะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) อิทธิพลของรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมเป็นอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไหร่ก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้างความยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น

ก.1 คุณสมบัติของสีย้อม

ในสีย้อมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวนลอย เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการย้อมสี อัตราการเกิดปฏิกิริยา การให้และรับอิเล็กตรอน สำหรับโครงสร้างทางเคมีของสีแต่ละ

ชนิดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของสีดังนี้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับอนุมูลของเส้นใยและสีย้อม
2. ความสามารถที่จะเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่ง ๆ
3. จลนพลศาสตร์ของสีย้อม
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของสี
5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความชื้น
7. ความทนต่อความร้อน และอื่น ๆ

การเลือกสีย้อมต้องเลือกตามชนิดของวัตถุที่จะย้อม มีความคงทนพอดีสามารถย้อมออกมาได้เหมือนสีตามตัวอย่าง และมีราคาถูกพอตามต้องการ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวนมาก และมักจะมีสีสันใกล้เคียงกัน ยากต่อการจดจำ เช่น สีฟ้าอาจจะมีสีฟ้าค่อนไปทางแดงหรือฟ้าค่อนไปทางเหลือง ดังนั้นจะต้องมีสัญลักษณ์ของสีเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

ก.2 สัญลักษณ์ของสี

ก.2.1 สัญลักษณ์บอกสี

บี (B)	ออกสีน้ำเงิน
จี (G)	ออกสีเขียวหรือเหลือง
เจ (J)	ออกสีเหลือง
เอม (M)	ออกสีแดงคล้ำ
อาร์ (R)	ออกสีแดง
วี (V)	ออกสีม่วง
วาย (Y)	ออกสีเหลือง

ก.2.2 สัญลักษณ์บอกความเข้มข้นของสี

เอ (A)	เข้มข้นมาก
อี (E)	เข้มข้นมากที่สุด (Excellent)
โอ (O)	เข้มข้นมาก

เอกซ์ (X)	เข้มข้นเป็นพิเศษ (Extra)
เค (K)	เข้มข้น (Konz)

ก.2.3 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี

ซี...(C=Chlorine)	ทนต่อสารคลอรีน (ฟอกขาวด้วยไฮโปรคลอไรด์ได้) บางครั้งใช้สีซีแอล มีความหมายเช่นเดียวกัน
ดี...(D=Discharge)	สามารถลอกสีออกได้ดี
ดี...(Disprese)	สีชนิดกระจายตัวได้
เอฟ...(F=Fast)	ความคงทนดีสีไม่ตก (สัญลักษณ์ตัวนี้จะระบุก่อนอย่างอื่น)
เอฟ...(F=Fine)	ให้สีสดไม่มีสิ่งอื่นปน (ระบุเป็นตัวสุดท้าย)
เอช...(H=Half Wool)	ใช้กับผ้าขนสัตว์ปนฝ้ายหรือปนเรยอนได้
เค...(K=Kait)	ใช้ย้อมเย็นได้
แอล...(L=Light)	ทนแสงได้ดี
เอน...(N=Neutral)	อาจย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกลางได้
พี...(P=Perion)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมไนลอน
เอส...(S=Soluble)	ละลายน้ำได้ดี
เอส...(S=Silk)	เหมาะสำหรับใช้ย้อมไหม
ที...(T=Tannin)	เหมาะสำหรับพิมพ์ลอกสีด้วยแทนนิน
ยู...(U=Ultra)	กระจายตัวได้ดีเป็นพิเศษ
ดับเบิลยู...(W=Washing)	ทนต่อการซักดี
ดับเบิลยู...(W=Wool)	สีไดเรคท์เหมาะสำหรับย้อมขนสัตว์

ก.2.4 สัญลักษณ์บอกคุณภาพ

ซีพี...(CP=Chemical pure)	มีความบริสุทธิ์สูง
เอฟแซด...(FZ=Free from Zinc)	ไม่มีสังกะสีปน
แซดเอฟ...(ZF=Zinc free)	ไม่มีสังกะสีปน

ก.3 การตั้งชื่อสี

สมาคมผู้ประกอบการย้อมสีในประเทศสหรัฐอเมริกาและอังกฤษ (American Association of Textile Chemists and Colorists และ Society of Dyes and Colorists) ได้ร่วมกันจัดทำทะเบียนรายชื่อสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขึ้นเรียกว่า Colour Index โดยตั้งชื่อให้กับสีแต่ละตัวเรียกว่า CI Generic Name โดยมีองค์ประกอบดังนี้

CI + ชื่อประเภทของสี + เฉดสี + หมายเลขลำดับ

โดยที่ประเภทของสีแบ่งออกเป็น 17 ประเภทคือ Acid, Azoic, Direct, Disperse, Fluorescent Briteners, Food, Ingrain, Leather, Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Solvent, Sulphur และ Vat

เฉดสีจะแบ่งออกเป็น 8 เฉดสีคือ Yellow, Orange, Red, Violet, Blue, Green, Brown และ Black

ตัวอย่างการเรียกชื่อสี เช่น CI Acid Yellow 1 หมายถึง สีแอสิคสีเหลืองหมายเลขหนึ่ง

ก.4 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้หลายแบบ เช่น จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ จำแนกตามลักษณะการใช้งาน และจำแนกตามวิธีการย้อม

ก.4.1 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

1. สีย้อมอะโซ (Azo dyes) คือสีย้อมที่มีกลุ่มอะโซ (N=N) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 50 ของสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด คุณลักษณะที่สำคัญของสีย้อมในกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกโทนสี แต่โดยทั่ว ๆ ไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และราคาไม่แพง

2. สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยแอน

ทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมด สีที่มีความสำคัญ คือ สีม่วง ฟ้า เขียว และแดงสด เป็นสีที่มีความสว่างสดใสดี และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มข้นของสีน้อยกว่าสีอะโซ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

3. สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dyes) เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีกลุ่มนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากเป็นสีที่มีราคาถูก นิยมใช้ย้อมสีทึบ ๆ ที่ต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ น้ำตาล และน้ำเงิน สีกลุ่มนี้มีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีทึบไม่สดใส

4. สีย้อมอินดิกอยด์ (Indigoid dyes) เป็นสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของสีอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

ก.4.2 จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

- สีย้อมฝ้าย ได้แก่ สีไดเรคท์ สีรีแอกทีฟ สีแว็ต สีซัลเฟอร์
- สีย้อมโพลีเอสเตอร์ ได้แก่ สีดิสเพอร์ส
- สีย้อมไนลอน ไหม และขนแกะ ได้แก่ สีแอสิค สีเมทัลคอมเพล็กซ์
- สีย้อมอะคริลิก ได้แก่ สีเบสิค

ก.4.3 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

ก.4.3.1 สีชนิดที่ละลายน้ำได้

- สีแอสิค
- สีเบสิค
- สีไดเรคท์
- สีรีแอคทีฟ

ก.4.3.2 สีชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้

- สีอะโซ
- สีดิสเพอร์ส
- สีแว็ต

- สีพิคเมนต์
- สีซัลเฟอร์
- สีเมทัลคอมเพล็กซ์

ก.4.4 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

1. สีไดเรคท์ สีย้อมไดเรคท์บางครั้งถูกเรียกว่าสีย้อมฝ้าย ชื่อของสีชนิดนี้ได้มาจากการที่สีย้อมชนิดนี้เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถย้อมติดใยฝ้ายโดยซึมเข้าไปภายในเซลลูโลสได้โดยตรง ไม่ต้องเติมสารช่วยย้อมใด ๆ ทั้งสิ้น แต่ในปัจจุบันการย้อมด้วยสีไดเรคท์นี้จะใช้เกลือเข้าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีกรดซัลโฟนิกซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้

2. สีรีแอคทีฟ เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ดีที่สุด สามารถละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติเป็นแอนอิออน โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติการละลายและการดูดติดเส้นใยของตัวสีจะทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในของเส้นใยได้ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีก็จะติดกับเส้นใย

3. สีแว็ต นิยมใช้ย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำจึงต้องใช้ตัวรับอิเล็กตรอนที่เหมาะสมมาทำให้ละลาย สารที่รับอิเล็กตรอนที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ หลังจากนั้นจะสูญเสียอิเล็กตรอนกลับเป็นตัวสีย้อมแว็ตที่ไม่ละลายน้ำดังเดิมทำให้เกิดการติดทนอย่างถาวรกับเส้นใยได้ดี โครงสร้างของสีประเภทนี้แตกต่างกันมาก สารประกอบเชิงซ้อนของสีทุกตัวจะต้องมีหมู่คาร์บอนิลอย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมอยู่ด้วยเสมอ

4. สีซัลเฟอร์ เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรเจน ใช้ย้อมใยฝ้ายโดยเฉพาะ สีที่ย้อมได้จะไม่ค่อยสดใส ตามปกติแล้วตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่โดยนำสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีชนิดนี้สามารถละลายน้ำได้ดี สีย้อมชนิดนี้ย้อมง่าย มีราคาถูกและมีความคงทนต่อน้ำได้ดี

5. สีดิสเพอร์ส สีชนิดนี้ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีชนิดนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียดละลายอยู่ในน้ำ เมื่อมีสารช่วยกระจายที่เหมาะสมจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีอย่างอื่นช่วย

สีดิสเพอร์สอาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน

6. สีแอสิค สีกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมกับเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง อาจจะนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ด้วย เช่น ปอ ป่าน และใยโพลีเอไมด์เป็นต้น ตัวสีย้อมเกิดจากเกลือโซเดียมของสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน มีโครงสร้างเป็นไอออนลบในส่วนประกอบที่ให้สี กลุ่มเคมีของสีแอสิคนี้ประกอบด้วย กลุ่มสีอะโซ (ประเภทไตรเอริลเมธ และแอนทราควิโนน) สีแอสิคดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บรักษาจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีดูดความชื้นเข้าไป จะทำให้เสื่อมสภาพเร็ว

7. สีเบสิค นิยมใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดสามารถใช้ย้อมเส้นใยอะไคริคได้ แต่ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ตัวสีย้อมเป็นเกลือเบสอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ ให้ไอออนบวก บางครั้งจะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีแคทอิออนิก ย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลของสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย เส้นใยประเภทนี้มีความคงทนต่ำ นิยมใช้กันในประเทศแถบตะวันออก ที่นิยมความสดใสของสีมากกว่าความคงทน

8. สีมอร์แดนท์ หรือสีโครม เป็นสีที่นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ตัวสีย้อมนี้อยู่ในกลุ่มสีย้อมแอสิคที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนทที่ถาวรขึ้นกับโลหะบางชนิดได้ เช่น โครเมียม อลูมิเนียม เป็นต้น สารโคออร์ดิเนทใหม่นี้จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าจึงทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำได้เพิ่มขึ้น สีประเภทนี้ใช้เป็นสีแอสิคไม่ได้เพราะว่าถ้ายังไม่ได้ให้ตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียม สีจะไม่คงทนต่อด่าง

9. สีย้อมอะโซอิค สีย้อมกลุ่มนี้นิยมใช้ย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีย้อมชนิดนี้เป็นสารประกอบอะโซเท่านั้น แต่ว่าตัวสีไม่ละลายน้ำ

10. สีย้อมโลหะ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสและให้สีต่าง ๆ กัน เมื่อย้อมแล้วต้องทำให้สารนี้ตกตะกอนภายในเส้นใยด้วย

ก.4.5 จำแนกตามวิธีการย้อม

1. การย้อมโดยตรงกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและตัวสีมีมาก การย้อมโดยตรงในน้ำซึ่งประกอบด้วยตัวสีและสารช่วยย้อมที่เหมาะสม ภาวะน้ำย้อมจำแนกออกตามชนิดของสารช่วยย้อมออกเป็น 3 ชนิด คือ เป็นกรด เป็นด่าง และเป็นกลาง สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีย้อมไดเรคท์ สีแอสิค สีเบสิค สีดิสเพอร์ส สีอาซิเตท ฯลฯ

2. การย้อมด้วยสารช่วยติดกำลังยึดระหว่างเส้นใยและตัวสีมีน้อย การนำไปย้อมด้วยสารเคมีก่อนจะช่วยให้เส้นใยและสีรวมตัวยึดกันได้ดีขึ้น ดังนั้นเวลาย้อมด้วยสารเคมีให้เป็นตัวกลางเชื่อมก่อน สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีเบสิค สีโครมที่เป็นกรด สีมอร์แดนท์

3. การย้อมแบบต้องลดขนาดตัวสีก่อน ตัวสีที่ไม่ละลายน้ำจะรวมตัวอยู่กับเส้นใยไม่ได้ เวลาย้อมต้องลดขนาดโมเลกุลของสีให้เล็กลงให้มากที่สุดก่อน (ละลาย) สารประกอบกลูโคสจะซึมเข้าไปภายในเส้นใยเวลาย้อมแล้วออกซิไดซ์คืนเป็นตัวสีเดิมที่ไม่ละลายน้ำได้แก่ สีกำมะถัน

4. การย้อมโดยวิธีออกซิไดซ์ต้องย้อมเส้นใยด้วยสารออกซิไดซ์ก่อนเพื่อให้สารนั้นทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่นตัวสีกับเส้นใยให้เกิดเป็นสี สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีออกซิเดชั่น สีแว้ตที่ละลายน้ำได้

5. การย้อมโดยทำให้เกิดสี ส่วนประกอบของสีแต่ละชนิดแยกกันย้อมทีละครั้ง การทำตกแต่งภายหลังให้เกิดเป็นสีไม่แต่เฉพาะจะใช้กับสีแนฟทอลเท่านั้น ใช้กับสีย้อมโดยตรงก็ได้ สีแนฟทอลและสีอาซิเตทที่ต้องย้อมทับล้วนรวมอยู่ในกลุ่มนี้

6. การย้อมที่ต้องทำให้สีติดสารที่ใช้เป็นตัวสีติดกับเส้นใยเองไม่ได้ต้องทำให้ติดโดยการย้อมทับหรือตกแต่งภายหลังย้อมใช้สารเคมีช่วย ได้แก่ ปิ๊กเมนต์ชนิดต่าง ๆ

ก.5 การย้อม

ก.5.1 หลักการย้อมผ้า

กรรมวิธีในการย้อมผ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การย้อมผ้าในหม้อต้มแบบครั้งคราว และการย้อมแบบต่อเนื่องในเครื่องย้อม การย้อมแบบครั้งคราวนั้นให้น้ำปริมาณน้อยแต่ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกสูง ส่วนการย้อมแบบต่อเนื่องจะให้ผลตรงกันข้าม เนื่องจากกรรมวิธีในการย้อมผ้าแต่ละแบบมีความแตกต่างกัน ทางด้านตัวสีย้อม สารช่วยย้อม และความสามารถติดสีบนเนื้อผ้า เป็นต้น จึงทำให้ปริมาณสารมลพิษที่ติดมากับน้ำย้อมแตกต่างกัน การย้อมที่มีประสิทธิ

ภาพนั้นก็คือการย้อมให้ผ้ามีสีที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งผืนผ้าและด้าย สีย้อมต้องติดเส้นใยเข้าไปถึงภายในและต้องทนต่อการซักล้างไม่หลุดออกได้ง่าย การย้อมโดยทั่วไปจะนำสีย้อมมาทำให้อยู่ในรูปสารละลายหรือสารแขวนลอย ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำมาย้อมเส้นใยที่ต้องการ ตามด้วยกระบวนการทำให้สีย้อมติดกับเส้นใยเพื่อให้ความคงทนต่อการซักล้างด้วยน้ำยาต่าง ๆ การย้อมสีโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

1. การทำให้เกิดการแพร่กระจายหรือซึมผ่านบนพื้นผิวของเส้นใย
2. การดูดซึมสีย้อมของเส้นใย
3. การซึมผ่านของโมเลกุลสีย้อมผ่านชั้นกั้นทางจุลศาสตร์เข้าไปสู่ภายในเส้นใย
4. การดูดซับ
5. การถ่ายสีด้วยแรงเชิงกลโดยการอัด
6. การกักเก็บเชิงกล
7. ปฏิกิริยาเคมีบนเส้นใย
8. การสร้างพันธะทางเคมีกับอนุมูลของเส้นใย
9. การละลายในเส้นใย เช่น การละลายของสีย้อมซนิดดิสเพอร์ส ที่เป็นของแข็ง ในเส้นใยโพลีเอสเตอร์

โดยปกติแล้วขั้นตอนที่สีย้อมซึมผ่านเส้นใยจะเป็นขั้นตอนที่ช้าและมีผลต่ออัตราการย้อมสีมากที่สุด ความเข้าใจในหลักการต่าง ๆ เหล่านี้จะเกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติของตัวย้อมสีซึ่งจะใช้เป็นหลักเกณฑ์สำคัญในการเลือกชนิดของสีย้อม โดยเฉพาะการผสมสี 3 สี เครื่องย้อมผ้ารุ่นใหม่ที่มีระบบควบคุมโดยไมโครโปรเซสเซอร์ สามารถควบคุมตัวแปรในการย้อมผ้าต่าง ๆ ได้ดี เช่น ปริมาณการใช้สีย้อมและสารเคมีต่างๆ

ก.5.2 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อม คือสารเคมีที่ใส่ลงไปในกระบวนการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดติดสีได้มากขึ้น ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทนสม่ำเสมอ

ก.5.2.1 ประเภทสารช่วยย้อม

1. กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอนเมื่อใช้สีย้อมแอสิค
2. ด่าง ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิค แว็ต และกำมะถัน

3. เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยด้วยสีย้อมแอสิค และการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด

4. สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีแว้ต

5. สารนำใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด

6. สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด

7. สารรับอิเล็กตรอน ใช้สำหรับรับอิเล็กตรอนจากสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

ก.5.3 น้ำย้อม / พื้นผิวที่สัมผัส

ลักษณะและอัตราการหมุนเวียนของของเหลว เช่น ในเครื่องเจ็ต เครื่องบีม หรือแพ็คเกจ จะทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของสีที่ย้อมให้คงที่

ก.5.4 วิธีการต่าง ๆ และเทคนิคในการย้อมสี

มีวิธีการและเทคนิคหลายอย่างที่ทำให้สีย้อมติดแน่นบนเส้นใยอย่างถาวร แต่ละวิธีจะมีลักษณะเฉพาะของตัวเอง

ก.5.5 อัตราส่วนของของเหลว

อัตราส่วนของของเหลวที่ใช้ในขณะย้อมสีจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการใช้สีทุกชนิด อัตราส่วนของของเหลวถูกกำหนดโดยชนิดของเครื่องที่ใช้ การใช้อัตราส่วนของของเหลวในอัตราต่ำ จะทำให้ปริมาณการใช้สีย้อมรีแอคทีฟเป็นไปอย่างประหยัดซึ่งจะช่วยลดการสูญเสีย เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสใน Dye bath เช่น ในการย้อมสีรีแอคทีฟบนด้ายดิบมักนิยมใช้เครื่องย้อมแบบแพ็คเกจ การย้อมด้วยเครื่องจิกเกอร์ จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการย้อมด้วยเครื่องวินซ์ และการย้อมสีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ก็คือวิธีการ Pad-roll หรือ Pad-batch ซึ่งจะใช้อัตราส่วนของของเหลวในการย้อมเป็น 1:1 ในปัจจุบันเทคนิคการย้อมสีรีแอคทีฟในอัตราส่วนของของเหลวที่ต่ำหรือต่ำมาก ๆ โดยเครื่อง Jet dyeing ได้ถูกพิจารณาแล้วว่าเป็นวิธีการที่ดีในแง่ของเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

สำหรับผ้าฝ้ายส่วนใหญ่แล้วจะย้อมด้วยสีไดเรคท์และสีรีแอคทีฟ ส่วนระบบการย้อมก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่หลายอย่าง เช่น ระบบการย้อมที่ใช้ปริมาณเกลือต่ำ อัตราส่วนของน้ำและวัสดุต่ำ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาผลิตสีย้อมใหม่ ๆ ขึ้นมา ทำให้อุตสาหกรรมฟอกย้อมสามารถ

ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนสูง มีต้นทุนการผลิตต่ำและยังช่วยลดปริมาณน้ำทิ้งที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมด้วย

ก.6 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ก.6.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

ก.6.1.1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมผ้า

1. กระบวนการต้มแป้ง เป็นการกำจัดแป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มแป้งเป็นการทำให้แป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้

2. กระบวนการทำความสะอาด เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำไปทอเป็นผืนผ้า

3. กระบวนการฟอกขาว เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออกโดยใช้สารเคมีคือ โซเดียมไฮโปคลอไรด์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการย้อมเพื่อให้สีติดดียิ่งขึ้นและสีไม่เปลี่ยน

4. กระบวนการชุบมัน เป็นการทำเพื่อให้ผ้าเพิ่มความมันและดูดสีได้มากขึ้น ทำให้ผ้านุ่มทำได้โดยการชุบผ้าลงในน้ำยาโซดาไฟที่อุณหภูมิต่ำ

5. กระบวนการย้อมสี และการตกแต่งพิเศษ

6. กระบวนการพิมพ์ผ้า

ก.6.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกย้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำจะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

ก.6.1.3 น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการย้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

ก.6.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดโรงงาน

ก.6.2 ลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียที่มาจากโรงงานต่าง ๆ จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใยที่นำมาย้อม และการใช้กระบวนการย้อมที่แตกต่างกัน

ก.6.2.1 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD, COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง ไขมัน และตัวทำละลายต่างๆ

2. มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้น้ำมีลักษณะความเป็นด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต

3. มีอุณหภูมิสูง

4. มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

5. มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า

6. มีโลหะเจือปน โลหะหนักนี้จะมาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี

7. มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง

ก.7 ประเภทสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย

สิ่งสกปรกเจือปนอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมจำแนกออกได้ดังนี้

1. สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมได้เพียงบางส่วนที่เหลือจะยังคงอยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีที่ยังคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทที่ใช้

2. สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้จะมีอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสีย

3. เศษเส้นใย

ก.8 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีดังนี้

1. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากน้ำย้อมผ้ามักมีสารที่มีพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น สารประกอบอนิลีน

2. การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางประเภท

3. ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดความรู้สึกรังเกียจต่อผู้พบเห็นทำให้ลำน้ำไม่น่าดู นอกจากนี้สีย้อมที่มีความเข้มสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำนั้น

ภาคผนวก ข

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ข.1 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส(TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก/ล. หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตาม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
6. ซัลไฟด์(Sulfide as H_2S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	ไทเทรต
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟี-นอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน ที่อุณหภูมิ20°C (Biochemical Oxygen Demand :BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand:COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plama : ICP
2. โครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเลนท์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนท์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิคเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. อาร์เซนิค (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	-Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	-Atomic Absorption Cold Vapour Techique

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ข.2 กำหนดประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมเป็นแหล่งกำเนิด มลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม

ข.2.1 ในประกาศนี้

- "โรงงานอุตสาหกรรม" หมายความว่า โรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน

- "นิคมอุตสาหกรรม" หมายความว่า นิคมอุตสาหกรรมตามกฎหมาย ว่าด้วยนิคมอุตสาหกรรม หรือโครงการที่จัดไว้สำหรับการประกอบอุตสาหกรรมที่มีการจัดการระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมกัน

- "น้ำเสีย" หมายความว่า ของเสียที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว รวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

- "น้ำทิ้ง" หมายความว่า น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสีย จากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในนิคมอุตสาหกรรมด้วย โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

- "แหล่งน้ำสาธารณะ" ให้หมายความรวมถึง ท่อระบายน้ำสาธารณะด้วย

- "การบำบัดน้ำเสีย" หมายความว่า กระบวนการทำหรือปรับปรุงน้ำเสียเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม แต่ทั้งนี้ ห้ามมิให้ใช้วิธีการทำให้เจือจาง(Dilution)

ข.2.2 โรงงานอุตสาหกรรมจำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 ตามบัญชีท้ายประกาศนี้ เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม

ข.2.3 นิคมอุตสาหกรรม ตามข้อ ข.2.1 เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม

ข.2.4 ห้ามมิให้เจ้าของหรือผู้ครอบครองโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรมตามข้อ ข.2.2 และข้อ ข.2.3 ปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม เว้นแต่น้ำเสียดังกล่าวไม่ว่าผ่านการบำบัดหรือไม่ก็ต้องมีคุณภาพตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 4 (พ.ศ.2539)วันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ข.3 กำหนดประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่อนุญาตให้ระบายน้ำทิ้งให้มีค่ามาตรฐานแตกต่างจากค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ใน ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ข.3.1 ให้โรงงานอุตสาหกรรม จำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 ดังต่อไปนี้ ระบายน้ำทิ้งที่มีค่าบีโอดีไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสัตว์ ซึ่งมิใช่สัตว์น้ำ ประเภทการฆ่าสัตว์
- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเมล็ดพืชหรือหัวพืชประเภทการทำแป้ง
- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารจากแป้งอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง
- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารสัตว์อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง
- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้ายหรือเส้นใย ซึ่งมิใช่ใยหิน (Asbestos) อย่าง ใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- โรงงานหมัก ชำแหละ อบ ป่นหรือบด ฟอก ขัดและแต่ง แต่งสำเร็จ อัดเป็นลายนูน หรือเคลือบสีหนังสัตว์

- โรงงานผลิตเยื่อหรือกระดาษอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเคมีภัณฑ์ สารเคมี หรือวัสดุซึ่งมิใช่ปุ๋ยอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับยาอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง

- โรงงานห้องเย็น

ข.3.2 ภายใน 1 ปี นับแต่วันที่ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2539) มีผลใช้บังคับให้โรงงานอุตสาหกรรม จำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 ตามบัญชีท้ายประกาศข้างต้น ระบายน้ำทิ้งที่มีค่าทีเคเอ็น ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เว้นแต่โรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 3

ข.3.3 ภายใน 2 ปี นับแต่วันที่ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ ฯ ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2539) มีผลใช้บังคับให้โรงงานอุตสาหกรรม จำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 ดังต่อไปนี้ ระบายน้ำทิ้งที่มีค่าทีเคเอ็นไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องปรุงหรือเครื่องประกอบอาหาร ประเภทการทำ เครื่องปรุงกลิ่น รสหรือสีของ

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารสัตว์ประเภทการทำอาหารผสม หรืออาหารสำเร็จรูป สำหรับเลี้ยงสัตว์

ข.3.4 ให้โรงงานอุตสาหกรรมจำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 ดังต่อไปนี้ ระบายน้ำทิ้งที่มีค่าซีโอดีไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร คือ

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับเครื่องปรุงหรือเครื่องประกอบอาหารประเภทการทำเครื่องปรุง กลิ่น รสหรือสีของอาหาร

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับอาหารสัตว์ ประเภทการทำอาหารผสมหรืออาหาร สำเร็จรูปสำหรับเลี้ยงสัตว์

- โรงงานประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ ด้ายหรือเส้นใย ซึ่งมีใช่ใยหิน (Asbes-tos) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง

- โรงงานหมัก ชำแหละ อบ ป่นหรือบด ฟอก ขัดและแต่ง แต่งสำเร็จ อัดให้เป็นลายนูนหรือเคลือบสีหนังสัตว์

- โรงงานผลิตเยื่อหรือกระดาษอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่าง

แหล่งที่มา: ประกาศคณะกรรมการควบคุมมลพิษ วันที่ 20 สิงหาคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 113 ตอนที่ 75ง ลงวันที่ 17 กันยายน 2539

ข.4 วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ความถี่และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ข.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งให้เก็บ ณ จุดที่ระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมนอกเขตที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรม ในกรณีที่มีการระบายน้ำทิ้งหลายจุดให้เก็บทุกจุด

ข.4.2 วิธีการเก็บ ความถี่และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งให้เป็นไปดังนี้

- โรงงานอุตสาหกรรม จำพวกที่ 2 และจำพวกที่ 3 ให้เก็บแบบจ้วง 1 ครั้ง
- นิคมอุตสาหกรรม ให้เก็บแบบผสมผสาน โดยเก็บ 4 ครั้ง ๆ ละ 500 มิลลิลิตร ทุก 2 ชั่วโมงต่อเนื่องกัน

แหล่งที่มา: ประกาศกรมควบคุมมลพิษ วันที่ 28 ตุลาคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 91ง ลงวันที่ 12 พฤศจิกายน 2539

ภาคผนวก ค

การหาความเข้มข้นของสารละลายสี

ค.1 วิธีการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (Calibration curve)

1. นำสารละลายสีที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวี- วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (λmax)
2. เตรียมสารละลายสีที่ความเข้มข้นต่าง ๆ
   - สารละลายสี Methylene Blue เตรียมที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 20 ppm
   - สารละลายสี Congo Red เตรียมที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 30 ppm
3. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ λmax ของแต่และสารละลายสี
4. นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลาย ก็จะได้กราฟเทียบมาตรฐาน

ค.2 วิธีการหาความเข้มข้นของสารละลายสี

1. นำสารละลายสีที่ต้องการหาความเข้มข้น มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ λmax ของแต่ละสารละลาย
2. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ มาหาความเข้มข้นโดยใช้เทียบมาตรฐาน

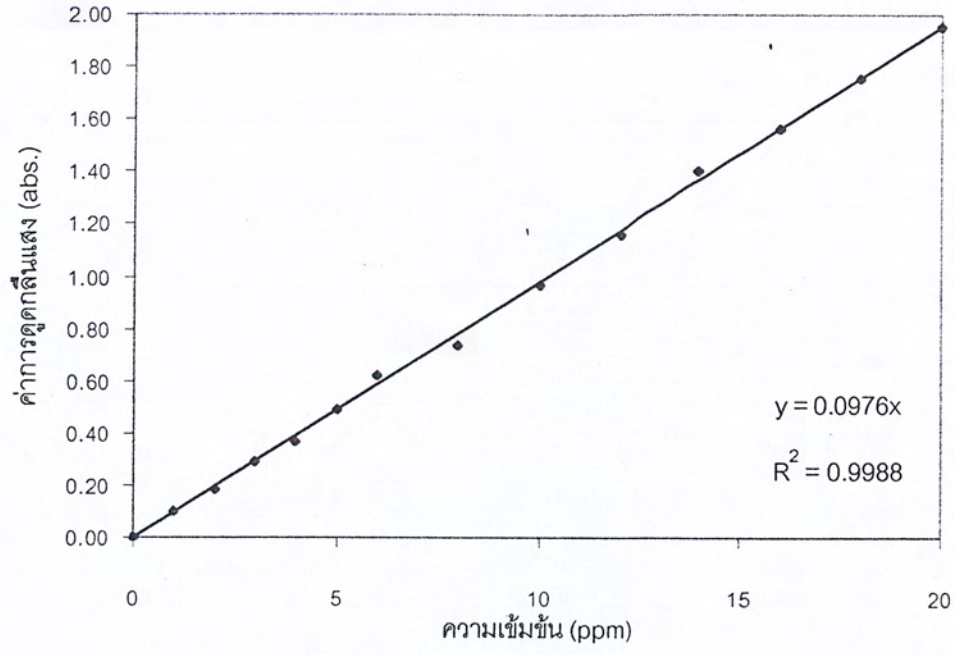
ค.3 กราฟเทียบมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุด (λmax)

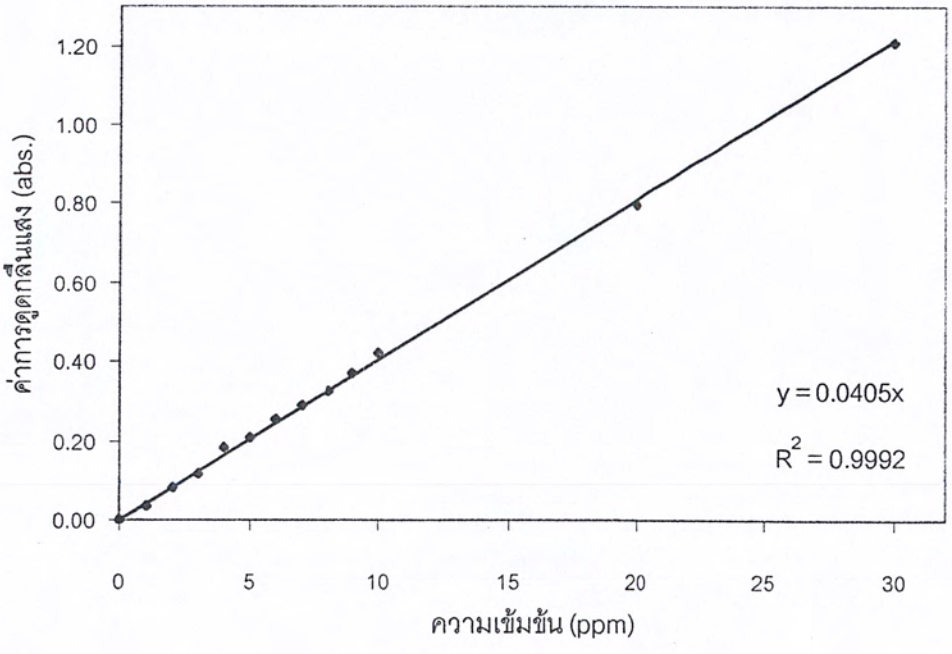
- สารละลายสี Congo Red = 497 นาโนเมตร
- สารละลายสี Methylene Blue = 610 นาโนเมตร

ตารางที่ ค.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสี Congo Red และ Methylene Blue

สารละลายสี Methylene Blue		สารละลายสี Congo Red	
ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)	ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
0	0.000	0	0.000
1	0.098	1	0.035
2	0.186	2	0.080
3	0.293	3	0.117
4	0.366	4	0.181
5	0.488	5	0.207
6	0.623	6	0.255
8	0.732	7	0.291
10	0.963	8	0.325
12	1.154	9	0.372
14	1.406	10	0.420
16	1.562	20	0.796
18	1.757	30	1.211
20	1.952	-	-



รูปที่ ค.1 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสี Congo Red



รูปที่ ค.2 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายสี Methylene Blue

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm

ตารางที่ ง.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
10	2.420	1.895	1.277	0.884	0.639
20	3.062	4.235	0.723	1.119	1.443
40	8.025	7.994	1.004	2.083	2.079
60	16.420	10.895	1.507	2.799	2.388
80	28.148	12.963	2.171	3.337	2.562
100	34.444	16.389	2.102	3.539	2.797
120	45.432	18.642	2.437	3.816	2.925
140	62.840	19.290	3.258	4.141	2.960
160	72.346	21.914	3.301	4.281	3.087
180	90.617	22.346	4.055	4.507	3.107
200	100.247	24.938	4.020	4.608	3.216
250	129.136	30.216	4.274	4.861	3.408
300	179.506	30.124	5.959	5.190	3.405
400	257.778	35.556	7.250	5.552	3.571
500	342.222	39.445	8.676	5.835	3.675
600	407.407	48.148	8.462	6.010	3.874
800	577.284	55.679	10.368	6.358	4.020

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
10	3.136	1.716	1.828	1.143	0.540
20	5.407	3.648	1.482	1.688	1.294
30	14.568	3.858	3.776	2.679	1.350
40	15.926	6.019	2.646	2.768	1.795
50	26.914	5.772	4.663	3.293	1.753
60	34.568	6.358	5.437	3.543	1.850
70	41.358	7.161	5.776	3.722	1.969
80	45.679	8.580	5.324	3.822	2.149
90	59.259	7.685	7.711	4.082	2.039
100	64.198	8.951	7.173	4.162	2.192
300	229.630	17.593	13.053	5.436	2.867
400	331.481	17.130	19.351	5.804	2.841
500	433.333	16.667	26.000	6.072	2.813
600	529.630	17.593	30.105	6.272	2.867
800	711.111	22.222	32.000	6.567	3.101

ตารางที่ ง.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
50	1.810	12.048	0.150	0.593	2.489
60	2.130	14.468	0.147	0.756	2.672
70	3.780	16.555	0.228	1.330	2.807
80	4.450	18.888	0.236	1.493	2.939
90	6.230	20.943	0.297	1.829	3.042
100	11.300	22.175	0.510	2.425	3.099
200	42.030	39.493	1.064	3.738	3.676
300	105.700	48.575	2.176	4.661	3.883
400	181.300	54.675	3.316	5.200	4.001
500	202.580	74.355	2.724	5.311	4.309
600	343.720	64.070	5.365	5.840	4.160
700	429.210	67.698	6.340	6.062	4.215
800	548.090	62.978	8.703	6.306	4.143
900	623.780	69.055	9.033	6.436	4.235
1000	764.020	58.995	12.951	6.639	4.077

ตารางที่ ง.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
50	3.680	11.580	0.318	1.303	2.449
60	6.470	13.383	0.483	1.867	2.594
70	9.530	15.118	0.630	2.254	2.716
80	12.460	16.885	0.738	2.523	2.826
90	12.910	19.273	0.670	2.558	2.959
100	21.550	19.613	1.099	3.070	2.976
200	77.830	30.543	2.548	4.355	3.419
300	144.480	38.880	3.716	4.973	3.660
400	230.190	42.453	5.422	5.439	3.748
500	298.090	50.478	5.905	5.697	3.922
600	423.420	44.145	9.592	6.048	3.787
700	547.640	38.090	14.378	6.306	3.640
800	642.030	39.493	16.257	6.465	3.676
900	696.350	50.913	13.677	6.546	3.930
1000	835.260	41.185	20.281	6.728	3.718

ตารางที่ ง.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด I Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
25	7.926	4.269	1.857	2.070	1.451
50	12.469	9.383	1.329	2.523	2.239
100	27.259	18.185	1.499	3.305	2.901
150	45.358	26.160	1.734	3.815	3.264
200	94.321	26.420	3.570	4.547	3.274
300	151.111	37.222	4.060	5.018	3.617
400	261.728	34.568	7.571	5.567	3.543
500	335.062	41.235	8.126	5.814	3.719
600	389.877	52.531	7.422	5.966	3.961
800	617.284	45.679	13.514	6.425	3.822
1000	776.543	55.864	13.901	6.655	4.023

ตารางที่ ง.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
25	7.111	4.472	1.590	1.962	1.498
50	13.580	9.105	1.492	2.609	2.209
100	30.123	17.469	1.724	3.405	2.860
150	62.469	21.883	2.855	4.135	3.086
200	93.333	26.667	3.500	4.536	3.283
300	186.173	28.457	6.542	5.227	3.348
400	275.062	31.235	8.806	5.617	3.442
500	360.741	34.815	10.362	5.888	3.550
600	436.296	40.926	10.661	6.078	3.712
800	644.444	38.889	16.571	6.468	3.661
1000	800.617	49.846	16.062	6.685	3.909

ตารางที่ ง.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
50	2.330	9.058	0.257	0.846	2.204
90	13.770	12.038	1.144	2.622	2.488
200	41.850	22.730	1.841	3.734	3.124
300	109.080	30.520	3.574	4.692	3.418
400	177.920	35.353	5.033	5.181	3.565
500	258.590	47.083	5.492	5.555	3.852
600	311.670	44.925	6.938	5.742	3.805
700	420.300	28.073	14.972	6.041	3.335
800	587.710	200.000	2.939	6.376	5.298

ตารางที่ ง.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหา Adsorption isotherm ของการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 60-100 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

C_o (ppm)	C (ppm)	q (mg/g)	C/q	ln(C)	ln(q)
50	3.54	11.615	0.305	1.264	2.452
90	7.24	20.690	0.350	1.980	3.030
500	157.61	85.598	1.841	5.060	4.450
600	260.91	84.773	3.078	5.564	4.440
700	356.19	85.953	4.144	5.875	4.454
800	414.96	96.260	4.311	6.028	4.567

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับ

ตารางที่ จ.1 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา	350 rpm			450 rpm			500 rpm		
(นาที)	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	89.8	0.00	1.00	89.5	0.00	1.00	93.8	0.00	1.00
2	84.1	1.14	0.94	85.6	0.78	0.96	88.5	1.06	0.94
4	81.7	1.62	0.91	77.5	2.40	0.87	83.0	2.16	0.88
6	78.1	2.34	0.87	78.4	2.22	0.88	79.3	2.90	0.85
8	74.8	3.00	0.83	75.8	2.74	0.85	76.0	3.56	0.81
10	71.9	3.58	0.80	72.5	3.40	0.81	73.1	4.14	0.78
15	68.9	4.18	0.77	67.4	4.42	0.75	70.4	4.68	0.75
20	66.7	4.62	0.74	63.2	5.26	0.71	66.4	5.48	0.71
30	62.3	5.50	0.69	63.0	5.30	0.70	61.7	6.42	0.66
40	58.0	6.36	0.65	59.0	6.10	0.66	59.0	6.96	0.63
50	54.4	7.08	0.61	57.0	6.50	0.64	57.5	7.26	0.61
60	52.3	7.50	0.58	53.0	7.30	0.59	54.6	7.84	0.58
70	50.9	7.78	0.57	50.7	7.76	0.57	52.8	8.20	0.56
80	50.2	7.92	0.56	49.8	7.94	0.56	51.4	8.48	0.55
90	48.1	8.34	0.54	47.4	8.42	0.53	48.9	8.98	0.52
100	47.4	8.48	0.53	47.4	8.42	0.53	47.7	9.22	0.51
110	45.4	8.87	0.51	45.3	8.84	0.51	46.4	9.48	0.49
120	44.3	9.10	0.49	44.9	8.92	0.50	45.4	9.68	0.48
130	43.6	9.24	0.49	43.2	9.26	0.48	44.0	9.96	0.47
140	43.5	9.26	0.48	42.7	9.36	0.48	42.8	10.20	0.46
150	42.5	9.46	0.47	41.5	9.60	0.46	42.3	10.30	0.45

ตารางที่ จ.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	350 rpm			450 rpm			500 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
160	41.8	9.60	0.47	40.7	9.76	0.45	41.7	10.42	0.44
170	41.7	9.62	0.46	40.7	9.76	0.45	41.5	10.46	0.44
180	40.5	9.86	0.45	40.5	9.80	0.45	41.5	10.46	0.44

ตารางที่ จ.2 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	350 rpm			450 rpm			500 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	96.5	0.00	1.00	100.3	0.00	1.00	101.4	0.00	1.00
5	95.6	0.18	0.99	97.7	0.52	0.97	99.6	0.36	0.98
10	92.3	0.84	0.96	96.4	0.78	0.96	95.7	1.14	0.94
20	92.1	0.88	0.95	95.9	0.87	0.96	95.3	1.22	0.94
30	91.1	1.08	0.94	91.9	1.68	0.92	92.1	1.86	0.91
40	89.6	1.38	0.93	90.4	1.98	0.90	89.6	2.36	0.88
50	89.4	1.42	0.93	90.0	2.06	0.90	89.1	2.46	0.88
60	89.1	1.48	0.92	89.9	2.08	0.90	88.1	2.66	0.87
70	87.7	1.76	0.91	88.6	2.34	0.88	86.8	2.92	0.86
80	87.2	1.86	0.90	88.1	2.44	0.88	85.7	3.14	0.85
90	86.2	2.06	0.89	87.8	2.50	0.88	85.3	3.22	0.84
100	85.2	2.26	0.88	87.6	2.54	0.87	84.9	3.30	0.84
110	85.2	2.26	0.88	87.3	2.60	0.87	84.1	3.46	0.83
120	84.4	2.42	0.87	86.3	2.80	0.86	83.5	3.58	0.82
130	83.3	2.64	0.86	86.0	2.86	0.86	83.1	3.66	0.82
140	82.1	2.88	0.85	85.9	2.88	0.86	81.6	3.96	0.80
150	82.1	2.88	0.85	85.9	2.88	0.86	81.2	4.04	0.80
160	82.1	2.88	0.85	85.3	3.00	0.85	79.9	4.30	0.79
170	82.1	2.88	0.85	84.2	3.22	0.84	79.2	4.44	0.78
180	80.9	3.12	0.84	83.8	3.30	0.84	78.4	4.60	0.77

ตารางที่ จ.3 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	350 rpm			450 rpm			500 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	94.9	0.00	1.00	94.1	0.00	1.00	93.5	0.00	1.00
5	28.3	13.32	0.30	26.9	13.44	0.29	36.8	11.34	0.39
10	19.9	15.00	0.21	17.7	15.28	0.19	23.4	14.02	0.25
15	18.3	15.32	0.19	18.5	15.12	0.20	19.1	14.88	0.20
20	15.3	15.92	0.16	13.2	16.18	0.14	16.4	15.42	0.18
30	15.2	15.94	0.16	13.1	16.20	0.14	14.3	15.84	0.15
40	13.8	16.22	0.15	11.5	16.52	0.12	12.7	16.16	0.14
50	13.2	16.34	0.14	12.7	16.28	0.13	11.6	16.38	0.12
60	12.9	16.40	0.14	12.4	16.34	0.13	10.9	16.52	0.12
70	12.7	16.44	0.13	12.1	16.40	0.13	10.6	16.58	0.11
80	12.4	16.50	0.13	12.0	16.42	0.13	10.4	16.62	0.11
90	12.2	16.54	0.13	11.8	16.46	0.13	10.1	16.68	0.11
100	12.1	16.56	0.13	11.5	16.52	0.12	9.9	16.72	0.11
110	11.9	16.60	0.13	11.3	16.56	0.12	10.8	16.54	0.12
120	11.6	16.66	0.12	11.2	16.58	0.12	9.8	16.74	0.10
130	11.5	16.68	0.12	11.1	16.60	0.12	9.5	16.80	0.10
140	11.4	16.70	0.12	11.0	16.62	0.12	9.3	16.84	0.10
150	11.2	16.74	0.12	10.9	16.64	0.12	9.2	16.86	0.10
160	11.2	16.74	0.12	10.8	16.66	0.11	9.2	16.86	0.10
170	11.2	16.74	0.12	10.7	16.68	0.11	9.1	16.88	0.10
180	11.0	16.78	0.12	10.6	16.70	0.11	9.0	16.90	0.10

ตารางที่ จ.4 ผลของความเร็วรอบต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	350 rpm			450 rpm			500 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	104.4	0.00	1.00	104.6	0.00	1.00	103.8	0.00	1.00
5	57.1	9.46	0.55	76.1	5.70	0.73	58.9	8.98	0.57
10	49.2	11.04	0.47	66.6	7.60	0.64	57.4	9.28	0.55
15	43.9	12.10	0.42	59.9	8.94	0.57	55.6	9.64	0.54
20	39.3	13.02	0.38	53.6	10.20	0.51	47.6	11.24	0.46
30	33.5	14.18	0.32	42.4	12.44	0.41	41.4	12.48	0.40
40	28.7	15.14	0.27	38.2	13.28	0.37	37.0	13.36	0.36
50	26.0	15.68	0.25	36.6	13.60	0.35	34.7	13.82	0.33
60	23.9	16.10	0.23	32.1	14.50	0.31	31.2	14.52	0.30
70	21.9	16.50	0.21	30.6	14.80	0.29	27.4	15.28	0.26
80	20.4	16.80	0.20	29.7	14.98	0.28	27.2	15.32	0.26
90	19.3	17.02	0.18	27.3	15.46	0.26	27.2	15.32	0.26
100	18.2	17.24	0.17	25.6	15.80	0.24	26.8	15.40	0.26
110	17.6	17.36	0.17	26.1	15.70	0.25	26.3	15.50	0.25
120	17.4	17.40	0.17	25.9	15.74	0.25	25.5	15.66	0.25
130	16.6	17.56	0.16	24.9	15.94	0.24	24.6	15.84	0.24
140	16.1	17.66	0.15	24.7	15.98	0.24	24.5	15.86	0.24
150	16.0	17.68	0.15	23.7	16.18	0.23	23.7	16.02	0.23
160	15.9	17.70	0.15	22.9	16.34	0.22	23.3	16.10	0.22
170	15.8	17.72	0.15	22.4	16.44	0.21	22.9	16.18	0.22
180	15.4	17.80	0.15	21.3	16.66	0.20	21.5	16.46	0.21

ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับ

ตารางที่ ฉ.1 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	Mesh number 20-60			Mesh number 60-100		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	89.8	0.00	1.00	102.7	0.00	1.00
2	84.1	1.14	0.94	94.6	1.63	0.92
4	81.7	1.62	0.91	79.8	4.59	0.78
6	78.1	2.34	0.87	77.8	4.98	0.76
8	74.8	3.00	0.83	75.3	5.48	0.73
10	71.9	3.58	0.80	72.6	6.02	0.71
15	68.9	4.18	0.77	73.3	5.87	0.71
20	66.7	4.62	0.74	64.2	7.70	0.63
30	62.3	5.50	0.69	58.8	8.79	0.57
40	58.0	6.36	0.65	52.8	9.97	0.51
50	54.4	7.08	0.61	51.9	10.17	0.50
60	52.3	7.50	0.58	49.4	10.66	0.48
70	50.9	7.78	0.57	47.7	11.01	0.46
80	50.2	7.92	0.56	46.7	11.21	0.45
90	48.1	8.34	0.54	46.4	11.26	0.45
100	47.4	8.48	0.53	44.2	11.70	0.43
110	45.4	8.88	0.51	44.2	11.70	0.43
120	44.3	9.10	0.49	43.0	11.95	0.42
130	43.6	9.24	0.49	41.0	12.34	0.40
140	43.4	9.28	0.48	40.0	12.54	0.39
150	42.5	9.46	0.47	40.0	12.54	0.39

ตารางที่ ฉ.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Mesh number 20-60			Mesh number 60-100		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
160	41.7	9.62	0.46	39.3	12.69	0.38
170	41.7	9.62	0.46	38.5	12.84	0.38
180	41.7	9.62	0.46	38.3	12.89	0.37

ตารางที่ ฉ.2 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	Mesh number 20-60			Mesh number 60-100		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	96.5	0.00	1.00	98.8	0.00	1.00
5	95.6	0.18	0.99	92.8	1.19	0.94
10	92.3	0.84	0.96	88.6	2.03	0.90
20	92.1	0.88	0.95	87.7	2.23	0.89
30	91.1	1.08	0.94	86.4	2.48	0.87
40	89.6	1.38	0.93	85.2	2.72	0.86
50	89.4	1.42	0.93	84.9	2.77	0.86
60	89.1	1.48	0.92	84.2	2.92	0.85
70	87.7	1.76	0.91	83.0	3.17	0.84
80	87.2	1.86	0.90	81.0	3.56	0.82
90	86.2	2.06	0.89	75.3	4.70	0.76
100	85.2	2.26	0.88	73.1	5.14	0.74
110	85.2	2.26	0.88	72.8	5.19	0.74
120	84.4	2.42	0.87	71.6	5.44	0.72
130	83.3	2.64	0.86	70.4	5.69	0.71
140	82.1	2.88	0.85	72.8	5.19	0.74
150	82.1	2.88	0.85	70.9	5.59	0.72
160	82.1	2.88	0.85	71.4	5.49	0.72
170	82.1	2.88	0.85	71.1	5.54	0.72
180	80.9	3.12	0.84	69.1	5.93	0.70

ตารางที่ ฉ.3 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	Mesh number 20-60			Mesh number 60-100		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	102.2	0.00	1.00	100.7	0.00	1.00
2	43.1	11.82	0.42	54.0	9.33	0.54
4	26.6	15.12	0.26	35.3	13.09	0.35
6	20.3	16.38	0.20	27.5	14.64	0.27
8	18.2	16.80	0.18	23.7	15.40	0.24
10	15.3	17.38	0.15	21.4	15.86	0.21
15	13.8	17.68	0.14	19.2	16.30	0.19
20	13.3	17.78	0.13	17.8	16.57	0.18
30	11.4	18.16	0.11	12.0	17.73	0.12
40	10.4	18.36	0.10	11.8	17.77	0.12
50	10.0	18.44	0.10	10.4	18.06	0.10
60	9.8	18.48	0.10	9.7	18.20	0.10
70	9.6	18.52	0.09	9.6	18.23	0.10
80	9.4	18.56	0.09	9.5	18.24	0.09
90	9.1	18.62	0.09	9.1	18.31	0.09
100	8.9	18.66	0.09	9.2	18.31	0.09
110	8.8	18.68	0.09	9.0	18.33	0.09
120	8.6	18.72	0.08	8.8	18.38	0.09
130	8.6	18.72	0.08	8.6	18.43	0.09
140	8.4	18.76	0.08	9.9	18.16	0.10
150	8.3	18.78	0.08	8.8	18.38	0.09
160	8.2	18.80	0.08	8.8	18.39	0.09
170	8.2	18.80	0.08	8.8	18.39	0.09
180	8.1	18.82	0.08	9.1	18.33	0.09

ตารางที่ ฉ.4 ผลของขนาดตัวดูดซับต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	Mesh number 20-60			Mesh number 60-100		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	106.9	0.00	1.29	100.7	0.00	1.00
2	83.0	2.41	1.00	20.6	16.03	0.20
4	70.9	4.91	0.85	13.1	17.52	0.13
6	58.4	5.71	0.70	11.0	17.94	0.11
8	54.5	6.53	0.66	7.6	18.61	0.08
10	50.4	7.62	0.61	7.1	18.72	0.07
15	44.9	8.54	0.54	7.1	18.73	0.07
20	40.3	9.74	0.49	6.9	18.75	0.07
30	34.3	10.72	0.41	6.9	18.76	0.07
40	29.4	11.27	0.35	6.7	18.79	0.07
50	26.7	11.71	0.32	6.6	18.82	0.07
60	24.4	12.11	0.29	6.5	18.83	0.06
70	22.5	12.42	0.27	6.4	18.86	0.06
80	20.9	12.65	0.25	6.3	18.87	0.06
90	19.7	12.86	0.24	6.2	18.89	0.06
100	18.7	12.99	0.23	6.3	18.89	0.06
110	18.0	13.03	0.22	6.3	18.89	0.06
120	17.8	13.20	0.21	6.2	18.89	0.06
130	17.0	13.31	0.20	6.3	18.89	0.06
140	16.5	13.33	0.20	6.2	18.90	0.06
150	16.4	13.35	0.20	6.2	18.90	0.06
160	16.3	13.37	0.20	6.2	18.90	0.06
170	16.2	13.45	0.19	6.3	18.89	0.06
180	15.7	16.60	0.19	6.2	18.90	0.06

ภาคผนวก ช

ตารางแสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับ

ตารางที่ ช.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา	100 ppm			200 ppm			300 rpm		
(นาที)	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	89.8	0.00	1.00	192.4	0.00	1.00	300.4	0.00	1.00
2	84.1	1.14	0.94	189.5	0.58	0.98	288.1	2.46	0.96
4	81.7	1.62	0.91	180.2	2.44	0.94	285.8	2.92	0.95
6	78.1	2.34	0.87	173.4	3.80	0.90	281.6	3.76	0.94
8	74.8	3.00	0.83	172.6	3.96	0.90	277.4	4.60	0.92
10	71.9	3.58	0.80	171.7	4.14	0.89	274.5	5.18	0.91
15	68.9	4.18	0.77	164.4	5.60	0.85	263.6	7.36	0.88
20	66.7	4.62	0.74	159.4	6.60	0.83	254.7	9.14	0.85
30	62.3	5.50	0.69	151.8	8.12	0.79	251.7	9.74	0.84
40	58.0	6.36	0.65	143.1	9.86	0.74	249.5	10.18	0.83
50	54.4	7.08	0.61	141.8	10.12	0.74	244.4	11.20	0.81
60	52.3	7.50	0.58	137.4	11.00	0.71	237.3	12.62	0.79
70	50.9	7.78	0.57	136.5	11.18	0.71	236.4	12.80	0.79
80	50.2	7.92	0.56	131.3	12.22	0.68	234.8	13.12	0.78
90	48.1	8.34	0.54	129.1	12.66	0.67	233.8	13.32	0.78
100	47.4	8.48	0.53	128.6	12.76	0.67	232.6	13.56	0.77
110	45.4	8.88	0.51	127.4	13.00	0.66	227.6	14.56	0.76
120	44.3	9.10	0.49	124.4	13.60	0.65	224.7	15.14	0.75
130	43.6	9.24	0.49	123.0	13.88	0.64	224.3	15.22	0.75
140	43.4	9.28	0.48	121.7	14.14	0.63	223.6	15.36	0.74
150	42.5	9.46	0.47	121.1	14.26	0.63	222.8	15.52	0.74

ตารางที่ ช.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	100 ppm			200 ppm			300 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
160	41.7	9.62	0.46	120.9	14.30	0.63	218.8	16.32	0.73
170	41.7	9.62	0.46	117.4	15.00	0.61	218.8	16.32	0.73
180	41.7	9.62	0.46	117.4	15.00	0.61	218.8	16.32	0.73

ตารางที่ ช.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	100 ppm			200 ppm			300 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	96.5	0.00	1.00	194.2	0.00	1.00	298.1	0.00	1.00
5	95.6	0.18	0.99	192.1	0.42	0.99	292.6	1.10	0.98
10	92.3	0.84	0.96	190.0	0.84	0.98	290.4	1.54	0.97
20	92.1	0.88	0.95	185.4	1.76	0.95	288.3	1.96	0.97
30	91.1	1.08	0.94	183.6	2.12	0.95	288.0	2.02	0.97
40	89.6	1.38	0.93	183.3	2.18	0.94	285.2	2.58	0.96
50	89.4	1.42	0.93	183.1	2.22	0.94	284.6	2.70	0.95
60	89.1	1.48	0.92	182.2	2.40	0.94	284.0	2.82	0.95
70	87.7	1.76	0.91	180.9	2.66	0.93	283.3	2.96	0.95
80	87.2	1.86	0.90	180.2	2.80	0.93	281.3	3.36	0.94
90	86.2	2.06	0.89	178.8	3.08	0.92	280.9	3.44	0.94
100	85.2	2.26	0.88	176.9	3.46	0.91	276.3	4.36	0.93
110	85.2	2.26	0.88	176.5	3.54	0.91	276.1	4.40	0.93
120	84.4	2.42	0.87	176.0	3.64	0.91	273.9	4.84	0.92
130	83.3	2.64	0.86	174.3	3.98	0.90	272.8	5.06	0.92
140	82.1	2.88	0.85	173.6	4.12	0.89	271.0	5.42	0.91
150	82.1	2.88	0.85	173.3	4.18	0.89	270.7	5.48	0.91
160	82.1	2.88	0.85	173.2	4.20	0.89	270.2	5.58	0.91
170	82.1	2.88	0.85	173.1	4.22	0.89	269.8	5.66	0.91
180	80.9	3.12	0.84	172.0	4.44	0.89	268.5	5.92	0.90

ตารางที่ ช.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	100 ppm			200 ppm			300 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	102.2	0.00	1.00	179.1	0.00	1.00	365.6	0.00	1.00
2	43.1	11.82	0.42	110.8	13.66	0.62	206.7	31.78	0.57
4	26.6	15.12	0.26	88.5	18.12	0.49	180.9	36.94	0.49
6	20.3	16.38	0.20	78.5	20.12	0.44	173.8	38.36	0.48
8	18.2	16.80	0.18	69.9	21.84	0.39	169.5	39.22	0.46
10	15.3	17.38	0.15	64.3	22.96	0.36	163.1	40.50	0.45
15	13.8	17.68	0.14	62.6	23.30	0.35	157.2	41.68	0.43
20	13.3	17.78	0.13	54.6	24.90	0.30	153.9	42.34	0.42
30	11.4	18.16	0.11	46.2	26.58	0.26	149.8	43.16	0.41
40	10.4	18.36	0.10	46.1	26.60	0.26	143.6	44.40	0.39
50	10.0	18.44	0.10	43.5	27.12	0.24	140.0	45.12	0.38
60	9.8	18.48	0.10	41.6	27.50	0.23	137.5	45.62	0.38
70	9.6	18.52	0.09	41.4	27.54	0.23	134.6	46.20	0.37
80	9.4	18.56	0.09	40.9	27.64	0.23	130.1	47.10	0.36
90	9.1	18.62	0.09	39.8	27.86	0.22	129.2	47.28	0.35
100	8.9	18.66	0.09	39.5	27.92	0.22	128.2	47.48	0.35
110	8.8	18.68	0.09	39.3	27.96	0.22	126.4	47.84	0.35
120	8.6	18.72	0.08	38.3	28.16	0.21	125.3	48.06	0.34
130	8.6	18.72	0.08	38.3	28.16	0.21	124.0	48.32	0.34
140	8.4	18.76	0.08	38.1	28.20	0.21	123.7	48.38	0.34
150	8.3	18.78	0.08	35.6	28.70	0.20	123.3	48.46	0.34
160	8.2	18.80	0.08	33.8	29.06	0.19	122.3	48.66	0.33
170	8.2	18.80	0.08	33.8	29.06	0.19	119.5	49.22	0.33
180	8.1	18.82	0.08	32.3	29.36	0.18	118.9	49.34	0.33

ตารางที่ ช.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลังขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C

เวลา (นาที)	100 ppm			200 ppm			300 rpm		
	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o	C ppm	q (mg/g)	C/C_o
0	106.9	0.00	1.83	216.2	0.00	1.44	305.1	0.00	1.44
2	83.0	4.78	1.42	177.3	7.77	1.18	272.6	6.51	1.28
4	70.9	7.19	1.21	163.2	10.61	1.08	240.6	12.91	1.13
6	58.4	9.69	1.00	150.6	13.12	1.00	212.5	18.52	1.00
8	54.5	10.49	0.93	143.2	14.59	0.95	200.9	20.83	0.95
10	50.4	11.31	0.86	135.6	16.12	0.90	192.0	22.61	0.90
15	44.9	12.40	0.77	122.8	18.69	0.82	178.6	25.29	0.84
20	40.3	13.32	0.69	112.5	20.73	0.75	165.0	28.02	0.78
30	34.3	14.52	0.59	99.2	23.41	0.66	141.1	32.79	0.66
40	29.4	15.50	0.50	88.5	25.55	0.59	130.4	34.94	0.61
50	26.7	16.05	0.46	81.5	26.93	0.54	117.5	37.52	0.55
60	24.4	16.49	0.42	79.7	27.29	0.53	109.4	39.14	0.51
70	22.5	16.89	0.38	73.8	28.49	0.49	106.5	39.72	0.50
80	20.9	17.20	0.36	69.5	29.35	0.46	100.7	40.87	0.47
90	19.7	17.43	0.34	68.4	29.56	0.45	99.2	41.19	0.47
100	18.7	17.64	0.32	63.4	30.56	0.42	97.8	41.45	0.46
110	18.0	17.77	0.31	62.3	30.77	0.41	94.7	42.08	0.45
120	17.8	17.81	0.31	59.6	31.32	0.40	90.8	42.87	0.43
130	17.0	17.98	0.29	57.9	31.66	0.38	89.5	43.13	0.42
140	16.5	18.09	0.28	55.2	32.20	0.37	83.9	44.23	0.40
150	16.4	18.11	0.28	53.4	32.56	0.35	81.3	44.76	0.38
160	16.3	18.13	0.28	52.6	32.73	0.35	76.6	45.70	0.36
170	16.2	18.15	0.28	50.3	33.19	0.33	74.8	46.07	0.35
180	15.7	18.23	0.27	49.1	33.42	0.33	73.2	46.38	0.34

ภาคผนวก ซ

ตารางแสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

ตารางที่ ซ.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20–60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 25 °C			อุณหภูมิ 35 °C			อุณหภูมิ 45 °C		
	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co
0	89.8	0.00	1.00	90.4	0.00	1.00	90.4	0.00	1.00
2	84.1	1.14	0.94	-	-	-	-	-	-
4	81.7	1.62	0.91	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	82.0	1.60	0.91	77.8	2.52	0.86
6	78.1	2.34	0.87	-	-	-	-	-	-
10	71.9	3.58	0.80	68.1	4.45	0.75	68.1	4.46	0.75
15	68.9	4.18	0.77	65.7	4.94	0.73	64.8	5.13	0.72
20	66.7	4.62	0.74	64.7	5.14	0.72	60.7	5.94	0.67
30	62.3	5.50	0.69	58.5	6.38	0.65	58.2	6.45	0.64
40	58.0	6.36	0.65	56.8	6.72	0.63	56.5	6.78	0.63
50	54.4	7.08	0.61	54.8	7.12	0.61	54.5	7.19	0.60
60	52.3	7.50	0.58	53.1	7.46	0.59	53.7	7.35	0.59
70	50.9	7.78	0.57	51.9	7.71	0.57	53.2	7.44	0.59
80	50.2	7.92	0.56	50.4	8.01	0.56	52.2	7.65	0.58
90	48.1	8.34	0.54	50.1	8.06	0.55	50.5	7.99	0.56
100	47.4	8.48	0.53	49.6	8.15	0.55	50.1	8.06	0.55
110	45.4	8.88	0.51	48.6	8.35	0.54	49.4	8.21	0.55
120	44.3	9.10	0.49	49.6	8.15	0.55	49.3	8.22	0.55
130	43.6	9.24	0.49	48.9	8.30	0.54	49.3	8.23	0.54
140	43.4	9.28	0.48	48.1	8.45	0.53	49.2	8.25	0.54
150	42.5	9.46	0.47	47.9	8.50	0.53	48.9	8.30	0.54

ตารางที่ ซ.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 25 °C			อุณหภูมิ 35 °C			อุณหภูมิ 45 °C		
	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co
160	41.7	9.62	0.46	47.4	8.60	0.52	48.8	8.32	0.54
170	41.7	9.62	0.46				48.7	8.35	0.54
180	40.5	9.86	0.45				48.7	8.35	0.54

ตารางที่ ซ.2 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20–60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 25 °C			อุณหภูมิ 35 °C			อุณหภูมิ 45 °C		
	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co
0	96.5	0.00	1.00	97.0	0.00	1.00	97.3	0.00	1.00
5	95.6	0.18	0.99	92.3	0.93	0.95	-	-	-
10	92.3	0.84	0.96	90.9	1.23	0.94	93.1	0.84	0.96
20	92.1	0.88	0.95	90.6	1.28	0.93	86.9	2.08	0.89
30	91.1	1.08	0.94	90.4	1.33	0.93	84.4	2.57	0.87
40	89.6	1.38	0.93	87.4	1.92	0.90	82.7	2.92	0.85
50	89.4	1.42	0.93	85.4	2.31	0.88	81.5	3.16	0.84
60	89.1	1.48	0.92	82.5	2.91	0.85	80.5	3.36	0.83
70	87.7	1.76	0.91	82.7	2.86	0.85	80.2	3.41	0.82
80	87.2	1.86	0.90	80.2	3.35	0.83	79.3	3.61	0.81
90	86.2	2.06	0.89	79.5	3.50	0.82	78.0	3.86	0.80
100	85.2	2.26	0.88	80.0	3.40	0.82	77.8	3.90	0.80
110	85.2	2.26	0.88	80.0	3.40	0.82	78.3	3.81	0.80
120	84.4	2.42	0.87	79.0	3.60	0.81	78.0	3.86	0.80
130	83.3	2.64	0.86	78.0	3.80	0.80	77.8	3.90	0.80
140	82.1	2.88	0.85	78.0	3.80	0.80	75.8	4.30	0.78
150	82.1	2.88	0.85	78.0	3.80	0.80	77.8	3.90	0.80
160	82.1	2.88	0.85	77.8	3.84	0.80	77.8	3.90	0.80
170	82.1	2.88	0.85	75.6	4.29	0.78	75.3	4.40	0.77
180	80.9	3.12	0.84	77.3	3.94	0.80	75.1	4.45	0.77

ตารางที่ ซ.3 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20–60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 25 °C			อุณหภูมิ 35 °C			อุณหภูมิ 45 °C		
	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co
0	102.2	0.00	1.00	82.5	0.00	1.00	85.3	0.00	1.00
2	43.1	11.82	0.42	32.0	10.10	0.39	28.1	11.45	0.33
4	26.6	15.12	0.26	23.1	11.88	0.28	15.0	14.07	0.18
6	20.3	16.38	0.20	21.9	12.11	0.27	18.1	13.44	0.21
8	18.2	16.80	0.18	19.5	12.60	0.24	16.3	13.81	0.19
10	15.3	17.38	0.15	17.9	12.91	0.22	12.6	14.54	0.15
15	13.8	17.68	0.14	17.3	13.04	0.21	15.2	14.02	0.18
20	13.3	17.78	0.13	13.3	13.83	0.16	13.6	14.33	0.16
30	11.4	18.16	0.11	14.8	13.54	0.18	12.1	14.65	0.14
40	10.4	18.36	0.10	12.4	14.02	0.15	12.1	14.65	0.14
50	10.0	18.44	0.10	12.9	13.92	0.16	10.8	14.90	0.13
60	9.8	18.48	0.10	12.8	13.94	0.16	11.6	14.73	0.14
70	9.6	18.52	0.09	11.9	14.13	0.14	10.9	14.88	0.13
80	9.4	18.56	0.09	11.5	14.19	0.14	10.6	14.94	0.12
90	9.1	18.62	0.09	11.0	14.30	0.13	10.2	15.02	0.12
100	8.9	18.66	0.09	11.8	14.15	0.14	8.6	15.34	0.10
110	8.8	18.68	0.09	11.6	14.17	0.14	10.5	14.96	0.12
120	8.6	18.72	0.08	11.3	14.23	0.14	10.3	15.00	0.12
130	8.6	18.72	0.08	10.9	14.32	0.13	10.7	14.92	0.13
140	8.4	18.76	0.08	9.5	14.59	0.12	11.1	14.84	0.13
150	8.3	18.78	0.08	11.2	14.25	0.14	9.4	15.17	0.11
160	8.2	18.80	0.08	10.9	14.32	0.13	9.8	15.11	0.11
170	8.2	18.80	0.08	10.2	14.46	0.12	9.9	15.09	0.12
180	8.1	18.82	0.08	10.2	14.46	0.12	9.8	15.11	0.11

ตารางที่ ซ.4 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ 25 °C			อุณหภูมิ 35 °C			อุณหภูมิ 45 °C		
	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co	C ppm	q (mg/g)	C/Co
0	106.9	0.00	1.00	108.6	0.00	1.00	110.9	0.00	1.00
2	83.0	4.78	0.78	-	-	-	65.0	9.19	0.59
4	70.9	7.19	0.66	-	-	-	50.4	12.11	0.45
5	-	-	-	49.3	11.86	0.45	-	-	-
6	58.4	9.69	0.55	-	-	-	43.4	13.49	0.39
8	54.5	10.49	0.51	-	-	-	38.7	14.44	0.35
10	50.4	11.31	0.47	37.1	14.29	0.34	36.4	14.90	0.33
15	44.9	12.40	0.42	-	-	-	30.5	16.07	0.28
20	40.3	13.32	0.38	30.1	15.70	0.28	28.0	16.58	0.25
30	34.3	14.52	0.32	25.5	16.62	0.23	23.4	17.50	0.21
40	29.4	15.50	0.27	24.0	16.91	0.22	21.0	17.98	0.19
50	26.7	16.05	0.25	19.4	17.84	0.18	18.6	18.47	0.17
60	24.4	16.49	0.23	18.3	18.07	0.17	18.3	18.53	0.16
70	22.5	16.89	0.21	16.8	18.36	0.15	16.2	18.95	0.15
80	20.9	17.20	0.20	16.5	18.43	0.15	16.4	18.91	0.15
90	19.7	17.43	0.18	15.3	18.66	0.14	15.4	19.10	0.14
100	18.7	17.64	0.17	14.4	18.84	0.13	15.3	19.12	0.14
110	18.0	17.77	0.17	14.2	18.89	0.13	15.0	19.18	0.14
120	17.8	17.81	0.17	14.1	18.91	0.13	14.3	19.33	0.13
130	17.0	17.98	0.16	13.6	18.99	0.13	14.2	19.35	0.13
140	16.5	18.09	0.15	13.9	18.95	0.13	13.9	19.41	0.12
150	16.4	18.11	0.15	13.5	19.01	0.12	13.0	19.58	0.12
160	16.3	18.13	0.15	13.4	19.03	0.12	14.5	19.28	0.13
170	16.2	18.15	0.15	13.3	19.05	0.12	13.5	19.47	0.12
180	15.7	18.23	0.15	13.3	19.05	0.12	14.5	19.28	0.13

ภาคผนวก ฌ

ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ

ตารางที่ ฌ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ สารละลายสี Congo Red โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

Time (min)	$t^{0.5}$	25 °C			35 °C			45 °C		
		q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t
0	0.00	0.00	0.98	-	0	0.93	-	0	0.92	-
2	1.41	1.14	0.93	1.75	-	-	-	-	-	-
4	2.00	1.62	0.90	2.47	-	-	-	-	-	-
5	2.24	-	-	-	1.6	0.85	3.13	2.52	0.77	1.98
6	2.45	2.34	0.86	2.56	-	-	-	-	-	-
8	2.83	3.00	0.82	2.67	-	-	-	-	-	-
10	3.16	3.58	0.78	2.79	4.45	0.62	2.25	4.46	0.59	2.24
15	3.87	4.18	0.74	3.59	4.94	0.56	-	5.13	0.51	2.92
20	4.47	4.62	0.70	4.33	5.14	0.54	3.89	5.94	0.38	3.37
30	5.48	5.50	0.61	5.45	6.38	0.35	4.70	6.45	0.28	4.65
40	6.32	6.36	0.51	6.29	6.72	0.27	5.95	6.78	0.20	5.90
50	7.07	7.08	0.40	7.06	7.12	0.17	7.02	7.19	0.06	6.95
60	7.75	7.50	0.33	8.00	7.46	0.06	8.04	7.35	0.00	8.16
70	8.37	7.78	0.26	9.00	7.71	-0.05	9.08	7.44	-0.04	9.41
80	8.94	7.92	0.23	10.10	8.01	-0.23	9.99	7.65	-0.15	10.46
90	9.49	8.34	0.11	10.79	8.06	-0.27	11.17	7.99	-0.44	11.26
100	10.00	8.48	0.06	11.79	8.15	-0.35	12.27	8.06	-0.54	12.41
110	10.49	8.88	-0.13	12.39	8.35	-0.60	13.17	8.21	-0.85	13.40
120	10.95	9.10	-0.28	13.19	8.15	-0.35	14.72	8.22	-0.89	14.60
130	11.40	9.24	-0.42	14.07	8.3	-0.52	15.66	8.23	-0.92	15.80
140	11.83	9.28	-0.47	15.09	8.45	-0.82	16.57	8.25	-1.00	16.97
150	12.25	9.46	-0.80	15.86	8.5	-1.00	17.65	8.3	-1.30	18.07

ตารางที่ ฌ.1(ต่อ)

Time (min)	$t^{0.5}$	25 °C			35 °C			45 °C		
		q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t
160	12.65	9.62	-	16.63	8.6	-	18.60	8.32	-1.52	19.23
170	13.04	9.62	-	17.67	8.45	-0.82	20.12	8.35	-	20.36
180	13.42	9.62	-	18.71	8.5	-1.00	21.18	8.35	-	21.56

ตารางที่ ฌ.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับสารละลายสี Congo Red โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

Time (min)	$t^{0.5}$	25 °C			35 °C			45 °C		
		q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t
0	0.00	0.00	0.49	-	0	0.60	-	0	0.65	-
5	2.24	0.18	0.47	27.78	0.93	0.48	5.38	-	-	-
10	3.16	0.84	0.36	11.90	1.23	0.43	8.13	0.84	0.56	11.90
20	4.47	0.88	0.35	22.73	1.28	0.42	15.63	2.08	0.37	9.62
30	5.48	1.08	0.31	27.78	1.33	0.42	22.56	2.57	0.27	11.67
40	6.32	1.38	0.24	28.99	1.92	0.31	20.83	2.92	0.18	13.70
50	7.07	1.42	0.23	35.21	2.31	0.21	21.65	3.16	0.11	15.82
60	7.75	1.48	0.21	40.54	2.91	0.01	20.62	3.36	0.04	17.86
70	8.37	1.76	0.13	39.77	2.86	0.03	24.48	3.41	0.02	20.53
80	8.94	1.86	0.10	43.01	3.35	-0.23	23.88	3.61	-0.08	22.16
90	9.49	2.06	0.03	43.69	3.5	-0.36	25.71	3.86	-0.23	23.32
100	10.00	2.26	-0.07	44.25	3.4	-0.27	29.41	3.9	-0.26	25.64
110	10.49	2.26	-0.07	48.67	3.4	-0.27	32.35	3.81	-0.19	28.87
120	10.95	2.42	-0.15	49.59	3.6	-0.47	33.33	3.86	-0.23	31.09
130	11.40	2.64	-0.32	49.24	3.8	-0.85	34.21	3.9	-0.26	33.33
140	11.83	2.88	-0.62	48.61	3.8	-0.85	36.84	4.3	-0.82	32.56
150	12.25	2.88	-0.62	52.08	3.8	-0.85	39.47	3.9	-0.26	38.46
160	12.65	2.88	-0.62	55.56	3.84	-1.00	41.67	3.9	-0.26	41.03
170	13.04	2.88	-0.62	59.03	4.29	-	39.63	4.4	-1.30	38.64
180	13.42	3.12	-	57.69	3.94	-	45.69	4.45	-	40.45

ตารางที่ ฌ.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ สารละลายสี Methylene Blue โดยต้นข้าวโพด ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

Time (min)	$t^{0.5}$	25 °C			35 °C			45 °C		
		q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t
0	0.00	0.00	1.27	-	0	1.16	-	0	1.19	-
2	1.41	11.82	0.85	0.17	10.1	0.65	0.20	11.45	0.59	0.17
4	2.00	15.12	0.57	0.26	11.88	0.43	0.34	14.07	0.10	0.28
6	2.45	16.38	0.39	0.37	12.11	0.39	0.50	13.44	0.28	0.45
8	2.83	16.80	0.31	0.48	12.6	0.30	0.63	13.81	0.18	0.58
10	3.16	17.38	0.16	0.58	12.91	0.23	0.77	14.54	-0.10	0.69
15	3.87	17.68	0.06	0.85	13.04	0.19	1.15	14.02	0.12	1.07
20	4.47	17.78	0.02	1.12	13.83	-0.12	1.45	14.33	0.00	1.40
30	5.48	18.16	-0.18	1.65	13.54	0.02	2.22	14.65	-0.16	2.05
40	6.32	18.36	-0.34	2.18	14.02	-0.24	2.85	14.65	-0.16	2.73
50	7.07	18.44	-0.42	2.71	13.92	-0.17	3.59	14.9	-0.36	3.36
60	7.75	18.48	-0.47	3.25	13.94	-0.19	4.30	14.73	-0.21	4.07
70	8.37	18.52	-0.52	3.78	14.13	-0.34	4.95	14.88	-0.34	4.70
80	8.94	18.56	-0.59	4.31	14.19	-0.40	5.64	14.94	-0.40	5.35
90	9.49	18.62	-0.70	4.83	14.3	-0.54	6.29	15.02	-0.49	5.99
100	10.00	18.66	-0.80	5.36	14.15	-0.36	7.07	15.34	-	6.52
110	10.49	18.68	-0.85	5.89	14.17	-0.38	7.76	14.96	-0.42	7.35
120	10.95	18.72	-1.00	6.41	14.23	-0.44	8.43	15	-0.47	8.00
130	11.40	18.72	-1.00	6.94	14.32	-0.57	9.08	14.92	-0.38	8.71
140	11.83	18.76	-1.22	7.46	14.59	-	9.60	14.84	-0.30	9.43
150	12.25	18.78	-1.40	7.99	14.25	-0.47	10.53	15.17	-0.77	9.89
160	12.65	18.80	-1.70	8.51	14.32	-0.57	11.17	15.11	-0.64	10.59
170	13.04	18.80	-1.70	9.04	14.46	-0.89	11.76	15.09	-0.60	11.27
180	13.42	18.82	-	9.56	14.46	-0.89	12.45	15.11	-0.64	11.91

ตารางที่ ฌ.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ สารละลายสี Methylene Blue โดยต้นมันสำปะหลัง ขนาด Mesh number 20-60 ที่ความเร็วรอบ 350 rpm

Time (min)	$t^{0.5}$	25 °C			35 °C			45 °C		
		q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t	q_t	$\log(q_1-q_t)$	t/q_t
0	0.00	0.00	1.26	-	0	1.28	-	0	1.29	-
2	1.41	4.78	1.13	0.42	-	-	-	9.19	1.02	0.22
4	2.00	7.20	1.04	0.56	-	-	-	12.11	0.87	0.33
5	2.24	-	-	-	11.86	0.86	0.42	-	-	-
6	2.45	9.70	0.93	0.62	-	-	-	13.49	0.78	0.44
8	2.83	10.49	0.89	0.76	-	-	-	14.44	0.71	0.55
10	3.16	11.31	0.84	0.88	14.29	0.68	0.70	14.9	0.67	0.67
15	3.87	12.40	0.77	1.21	-	-	-	16.07	0.55	0.93
20	4.47	13.33	0.69	1.50	15.7	0.53	1.27	16.58	0.48	1.21
30	5.48	14.52	0.57	2.07	16.62	0.39	1.81	17.5	0.32	1.71
40	6.32	15.51	0.44	2.58	16.91	0.33	2.37	17.98	0.20	2.22
50	7.07	16.02	0.35	3.12	17.84	0.08	2.80	18.47	0.05	2.71
60	7.75	16.50	0.24	3.64	18.07	-0.01	3.32	18.53	0.02	3.24
70	8.37	16.89	0.13	4.14	18.36	-0.16	3.81	18.95	-0.20	3.69
80	8.94	17.21	0.01	4.65	18.43	-0.21	4.34	18.91	-0.17	4.23
90	9.49	17.44	-0.10	5.16	18.66	-0.41	4.82	19.1	-0.32	4.71
100	10.00	17.65	-0.23	5.67	18.84	-0.68	5.31	19.12	-0.34	5.23
110	10.49	17.78	-0.34	6.19	18.89	-0.80	5.82	19.18	-0.40	5.74
120	10.95	17.82	-0.38	6.73	18.91	-0.85	6.35	19.33	-0.60	6.21
130	11.40	17.99	-0.60	7.23	18.99	-1.22	6.85	19.35	-0.64	6.72
140	11.83	18.09	-0.82	7.74	18.95	-1.00	7.39	19.41	-0.77	7.21
150	12.25	18.11	-0.89	8.28	19.01	-1.40	7.89	19.58	-	7.66
160	12.65	18.13	-0.96	8.83	19.03	-1.70	8.41	19.28	-0.52	8.30
170	13.04	18.15	-1.05	9.37	19.05	-	8.92	19.47	-0.96	8.73
180	13.42	18.24	-	9.87	19.05	-	9.45	19.28	-0.52	9.34